RECHERCHE COOPÉRATIVE SUR PROGRAMME DU C.N.R.S. N° 40
ÉCOLOGIE DU SOL

DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DE DEUX SOLS EN CLIMAT TEMPÉRÉ

par

Georges BACHELIER et **André COMBEAU**
Directeurs de laboratoire
S. S. C. — O. R. S. T. O. M.
93 - Bondy, France

(avec la collaboration technique de Mme E. DRIFFORT et Mme E. GUÉRIN)

PREMIÈRE PARTIE

OBSERVATIONS SUR UN SOL PODZOLIQUE A PSEUDOGLEY DE LA FORÊT DE SENART (STATION R.C.P. 40)

SOMMAIRE

I. — INTRODUCTION

Dans le cadre d'un travail de Recherche Coopérative sur Programme (R.C.P. 40), nous avons suivi, pendant un cycle annuel complet, certains des aspects de la dynamique du sol podzolique à pseudogley qui représente bien les sols de la forêt de Sénart et entre parfaitement dans l'évolution pédologique des sols sur limons, telle qu'elle a été étudiée par FEDOROFF (1968).

Certaines des caractéristiques pédologiques et microbiologiques de ce sol ont déjà été décrites dans un précédente note (BAUZON, ROUILLER, BACHELIER, 1967), aussi n'en sera t-il repris que ce qui nous paraît devoir être complété ou corrigé en fonction des données nouvellement acquises. Notre intention demeure de nous limiter plus particulièrement dans ce texte aux conséquences pédologiques du régime hydrique local.

La comparaison de ce sol podzolique à pseudogley avec le sol brun calcaire du Parc de Brunoy, autre sol typique de la station R.C.P. 40, sera faite dans le seconde partie de cette publication.

Le sol podzolique à pseudogley ici étudié se situe près de Brunoy, sur la surface plane qui constitue le plateau de la forêt de Sénart dominant le confluent de la Seine et de l'Yerres. Sur le Sannoisien argileux s'est déposé là un cailloutis pliocène (CAILLEUX et MICHEL, 1967), qui a été secondairement remanié par un apport de limon de plateaux. Une petite surface de sables de Fontainebleau subsisterait encore sur les argiles Sannoisiennes, à quelque distance de notre lieu d'études, mais ne paraît pas avoir influencé la nature des sols.

Dans son relevé floristique de la station, LACOSTE note sous *Quercus sessiliflora* la présence d'une strate herbacée assez variée, avec notamment présence de *Molinia coerulea, Deschampsia flexuosa, Calluna vulgaris et Carex,* ainsi qu'une strate muscinale à *Polytrichum formosum.*

II. — MORPHOLOGIE DU PROFIL

Reprenant la description de ce profil, déjà étudié dans BAUZON, ROUILLER et BACHELIER (1967) et revu en ce qui concerne les zones de réduction dans BACHELIER (1969), nous pouvons actuellement en donner la description suivante, schématisée par ailleurs graphiquement sur la figure 1.

A_{oo}	Litière à décomposition lente, épaisse de 1 à 2 cm.
A_o/A_1 (0-4, 5 cm)	Horizon humifère peu épais, brun gris foncé et de type mor-moder, très organique et feutré par les racines. Texture limoneuse, structure particulaire avec aspect grenu à l'état humide. Consistance meuble à sec. Forte porosité.
$A_{2\text{-}1}$ (4,5-5 cm)	Léger blanchiment à la base de l'horizon A_1.
$A_{2\text{-}2}$ (5-29 cm)	Horizon limoneux de couleur brun jaune clair de 5 à 15 cm, puis brun jaune clair à jaune pâle de 15 à 25 cm. Structure polyédrique, fragile à sec et meuble à l'état humide Horizon collant à l'état trempé. Porosité faible et fine. Auréoles de réduction autour

des racines, et présence d'une zone plus réductrice vers 10 à 15 cm, zone qui correspond vraisemblablement à la décomposition microbienne de substances organiques lessivées de l'horizon A_1 (auréoles et zone réductrice visible seulement après coloration). Racines horizontales tendant à s'arrêter à partir de 25 cm.

A_{2-3} (29-34 cm) Horizon toujours limoneux, mais renfermant de très nombreux morceaux de meulière gréseuse à orientation horizontale. Cette formation de meulières est plus ou moins localement disloquée par les racines.

Bg_{1-1} (34-45 cm) Pseudogley où les parties blanchies sont fortement déferrifiées et qui est, peut-être en voie de fossilisation, la profondeur de 45 cm correspondant en effet au niveau maximum généralement atteint par la nappe perchée en février et mars.

Bg_{1-2} (45-80 cm) Pseudogley plus marqué où les parties décolorées (environ 70 %) sont plus riches en fer réduit.

à 70-80 cm Présence d'une ligne de graviers et cailloux. Dominance de silex anguleux à gaine plus ou moins ternie et usée, silex jaspés parfois arrondis, et présence de petits graviers de quartz roulés.

g_2 (80-150 cm) Pseudogley où les parties blanchies sont fortement déferrifiées et qui est, peut-être, en mais renferment toujours dans leur ensemble du fer ferreux en quantité. Texture argileuse très plastique à l'état trempé. Horizon très peu poreux et faiblement calcaire à partir de 100 cm. De tous petits nodules calcaires (ou poupées) apparaissent à partir de 120-130 cm. Le taux d'humidité de cet horizon varie peu au cours de l'année (cf courbes de pF).

Ces divers critères justifient la classification du sol étudié dans les sols podzoliques à pseudogley.

III. — VARIATIONS DE LA NAPPE

Pour évaluer l'importance de l'hydromorphie dans un tel profil, des piézomètres ont été mis en place afin de suivre l'évolution de la nappe phréatique au cours de l'année. Ces piézomètres sont constitués par des tubes de lucoflex de 80 mm de diamètre, à perforations latérales, mis en place dans des trous de sondage effectués à la tarière de 10 cm de diamètre, l'intervalle entre la paroi du forage et le tube étant comblé par du gravier calibré entre 5 et 10 mm. Les profondeurs atteintes sont de 2 et 3 mètres.

Les résultats des mesures figurent sur le graphique 1. La forme de la courbe obtenue est caractéristique, et peut se schématiser par :

— un palier en hiver au voisinage de 45 à 50 cm de profondeur ;

— une descente régulière du 1er mai au 1er septembre ou au 1er octobre ;

— une cote minimum d'été voisine de 2,60 m en octobre et novembre 1967, de 2,20 m entre le 1er septembre et fin décembre 1968 ;

— une remontée brutale en décembre 1967 et en fin février 1969, avec parfois de fortes amplitudes de variation au cours de cette remontée.

Cette évolution appelle quelques commentaires :

a) Le plus haut niveau atteint par la nappe pendant la période de mesure se situe généralement au voisinage du sommet de l'horizon de pseudogley g_{1-2} (45 cm environ), mais peut parfois temporairement se situer aussi dans l'horizon de pseudogley g_{1-1} (34-45 cm).

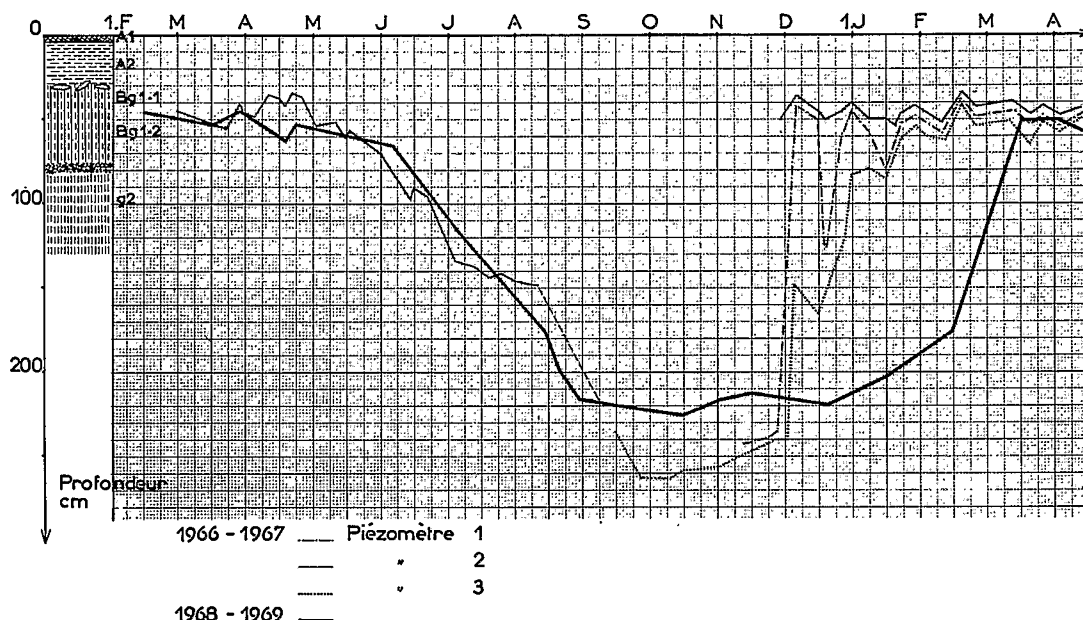


FIGURE 1. — Variations saisonnières de la nappe.

b) La validité des indications des piézomètres semble douteuse pour les périodes pendant lesquelles le toit de la nappe est situé à une profondeur plus grande que 70-80 cm (juin à décembre). En effet, les sondages effectués pour prélever des échantillons destinés à l'établissement des profils hydriques n'ont jamais traversé pendant ces périodes de zones gorgées d'eau entre 80 et 200 cm. De plus, ces forages ne se sont pas remplis d'eau dans les jours suivants. Il semble donc que le niveau d'eau dans les piézomètres ne s'équilibre pas avec le niveau d'une nappe au printemps et en été, mais qu'il traduise simplement un remplissage par les eaux de la nappe perchée suivi d'un assèchement progressif du forage. Cette hypothèse sera étayée plus loin au moyen des résultats de mesure des profils hydriques et du potentiel capillaire. Elle permet d'expliquer la régularité de la baisse du niveau de la nappe en été, mais surtout la brutalité de la remontée en automne ou en hiver. Elle permet d'interpréter les phénomènes de remontée qui se manifestent parfois de façon sensible lorsque le niveau de nappe est au voisinage du plancher de l'horizon de pseudogley. Dans ces conditions, la nappe peut être considérée comme une *nappe perchée,* oscillant entre les profondeurs 40 et 80 cm, et diparaissant du 15 juin au 1er décembre.

c) Les chiffres obtenus pendant l'hiver 1966-67 peuvent être considérés comme caractéristiques d'une année normale, alors que ceux de l'hiver 1968-69 s'en écartent sensiblement : en effet, la pluviométrie de l'automne 1968 a été faible, et la remontée de la nappe a eu lieu très tard. (Ceci a pu être établi par comparaison avec les variations de la nappe à Bondy; en ce point d'observation, les variations sont suivies régulièrement depuis 3 ans, et la remontée au cours de l'hiver 1968-69 a subi un retard de 2 mois par rapport aux années précédentes).

d) On peut donc estimer que l'engorgement affecte bien la zone comprise entre 40 et 80 cm, par conséquent exclusivement l'horizon de pseudogley g_1, la période d'engorgement se situe en année normale sensiblement du 15 janvier au 15 avril au sommet du pseudogley, et du 15 décembre

au 1er-15 juin à la base du pseudogley. Il s'agit d'une hydromorphie qui affecte l'horizon de pseudogley de façon continue pendant 3 mois environ pour la partie supérieure, pendant 5 mois pour la partie basse, ces chiffres étant naturellement susceptibles de quelques variations d'une année à l'autre.*

IV. — COMPOSITION GRANULOMETRIQUE

A. — RÉSULTATS D'ANALYSES

Les résultats d'analyse granulométrique des 130 cm supérieurs du profil sont consignés dans le tableau I et synthétisés sur les graphiques 2 et 3. De 130 à 220 cm, les résultats d'analyse sont synthétisés sur le graphique 3.

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

TABLEAU I

Composition granulométrique

Echantillon		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Profondeurs (cm)		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
Argile	0–2μ	13,6	11,9	12,0	16,2	22,0	28,4	35,3	41,6	48,5	42,7	42,9	40,0	38,8
Limons fins	2–20μ	20,4	20,4	21,3	19,7	20,6	16,3	14,6	9,3	5,9	4,4	3,9	4,9	3,4
Limons grossiers	20–50μ	27,0	28,5	27,8	26,9	24,8	21,2	18,3	11,7	7,1	6,7	6,2	6,4	6,1
Sables fins	50–200μ	17,1	16,6	16,3	16,0	13,1	12,9	13,2	15,7	26,3	33,4	38,0	41,1	47,5
Sables grossiers	200–2 000μ	21,9	22,6	22,6	21,3	19,5	21,2	18,6	21,7	12,2	12,8	8,9	7,6	4,2
Sables totaux	20–2 000μ	39,0	39,2	38,9	37,3	32,6	34,1	31,8	37,4	38,5	46,2	46,9	48,7	51,7
% Graviers et cailloux		13,6	17,2	23,1	23,7	12,3	9,3	6,9	28,3	7,8	3,1	2,3	1,5	2,1

a) **Argile** (0-2 μ).

La teneur en argile du sol étudié, faible en surface et sensiblement constante (12 % environ) dans les 30 cm supérieurs du profil, augmente ensuite fortement et très régulièrement de 30 à 90 cm, où elle atteint 46 %, puis diminue ensuite jusqu'à 130 cm. Une telle évolution pourrait évoquer un profil de sol lessivé en argile, mais l'examen d'autres données permettra par la suite de nuancer cette hypothèse.

* On notera par ailleurs que les indications de 3 piézomètres pourtant situés à une dizaine de mètres les uns des autres sont souvent discordantes, en particulier lors de la remontée de la nappe, ce qui renforce l'hypothèse d'une nappe perchée.

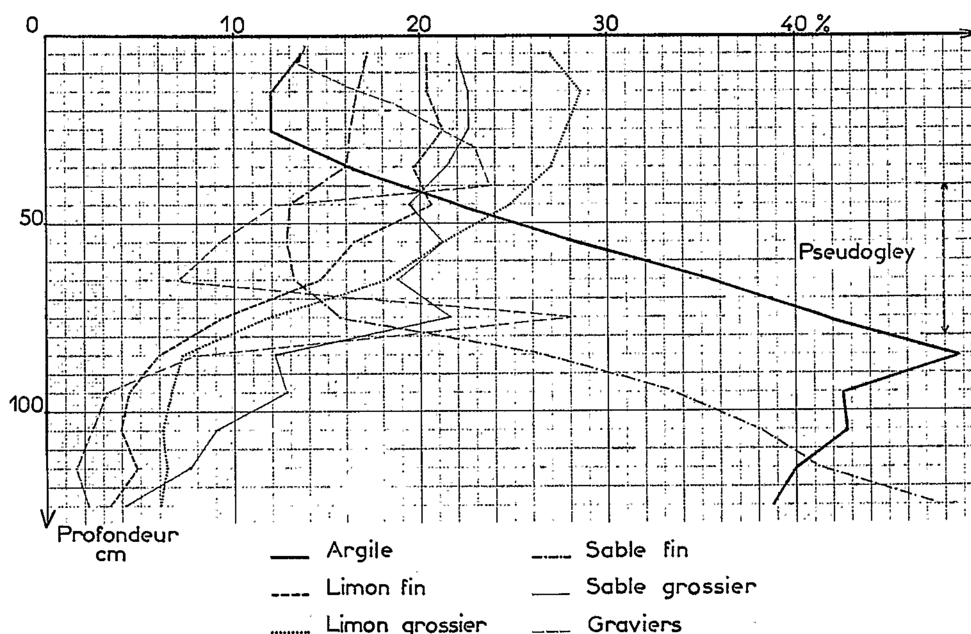


FIGURE 2. — Composition granulométrique à différentes profondeurs.

b) **Limon fin** (2-20 μ).

La teneur en limon fin est, elle aussi, relativement constante dans les 50 cm supérieurs du sol (20 %) et supérieure au taux d'argile. Mais elle diminue ensuite régulièrement jusqu'à 90 cm, pour demeurer constante, et au voisinage de 4 %, au delà de cette profondeur.

c) **Limon grossier** (20-50 μ).

L'évolution du taux de limon grossier est comparable à celle de la teneur en limon fin : ce taux est de l'ordre de 27 à 29 % dans les 40 cm supérieurs du sol. Il diminue ensuite régulièrement pour se fixer au voisinage de 6 % à partir de 90 cm de profondeur.

d) **Sable fin** (50-200 μ).

La teneur en sables fins, de l'ordre de 16 à 17 % dans les 40 cm supérieurs du profil, s'abaisse à 13 % environ entre 40 et 70 cm, puis remonte régulièrement en profondeur pour atteindre 45 % à 130 cm.

e) **Sable grossier** (0,2-2 mm).

Les teneurs observées oscillent dans les 8 cm supérieurs du profil, puis diminuent brusquement à 80 cm (12 % environ), plus lentement ensuite.

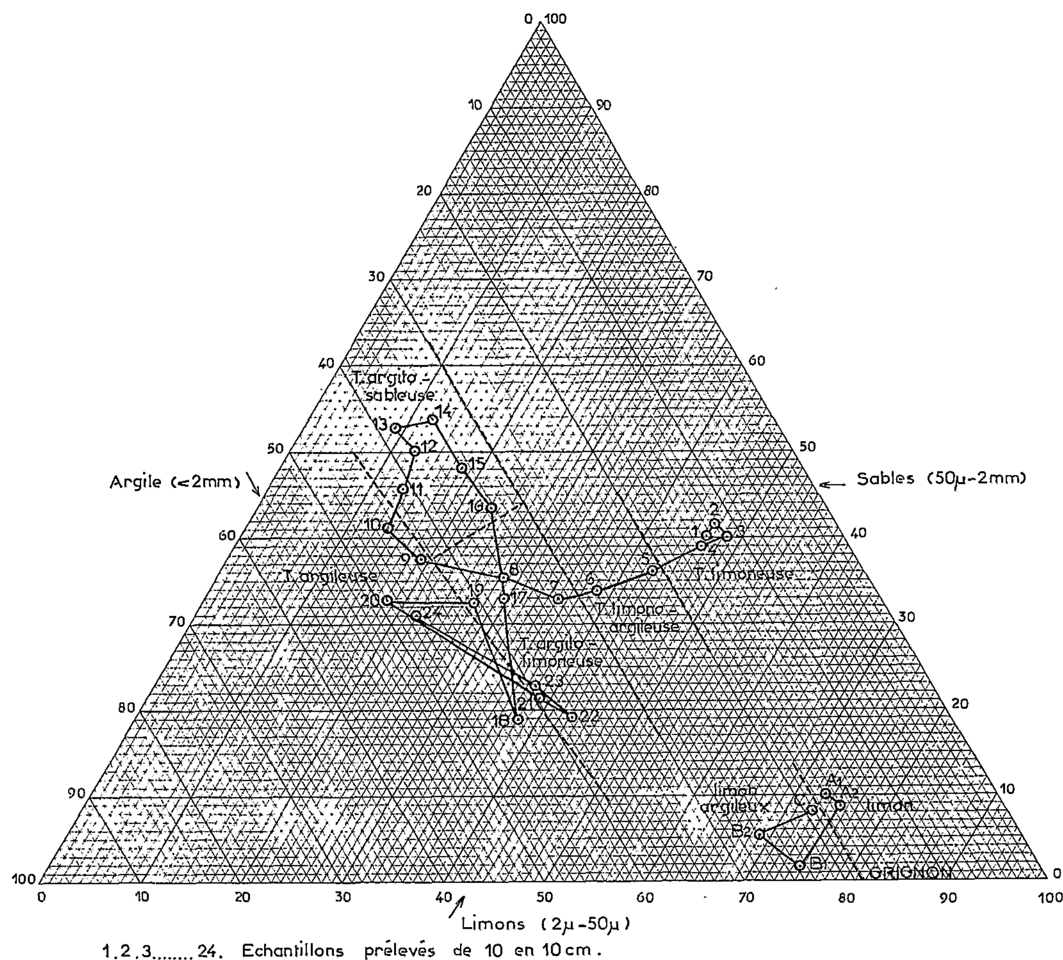


FIGURE 3. — Texture des divers horizons du profil.

f) **Graviers** (2 mm - 2 cm) **et Cailloux** (2-20 cm).

Tout le profil est assez riche en cailloutis pliocène, mais le maximum de graviers et cailloux observable entre 20 et 40 cm (23 à 24 %) correspond en fait à une dominance de meulières gréseuses arrondies, alors que seul le maximum de graviers et cailloux situé à 70-80 cm (28,3 %) correspond à un banc assez finement gravillonnaire de cailloutis pliocène.

En dessous de ce banc, le gravier devient beaucoup plus rare et change de nature avec une dominance de silex à gaine blanche et de petits quartz hyalins aux arêtes fortement émoussées ou arrondies.

A 120-130 cm, de tous petits nodules calcaires constituent 38 % des graviers et 0,08 % de la terre totale.

D'après ces résultats bruts, le sol étudié a dans les 40 cm supérieurs du profil, une texture nettement limoneuse qui rappelle celle des limons de plateaux, mais avec une proportion nettement plus forte de sables totaux. Cette texture devient limono-argileuse entre 40 et 60 cm, argilo-limoneuse de 60 à 80 cm, argileuse de 80 à 100 cm et argilo-sableuse entre 100 et 150 cm. Dans la terminologie américaine de l'USDA, ces textures correspondent aux termes de « loam » entre 0 et 60 cm, « clay loam » de 60 à 80 cm, « clay » entre 80 et 90 cm, et « sandy-clay » de 90 à 130 cm.

On peut donc considérer que le niveau superficiel entre 0 et 80 cm du sol étudié est un produit de remaniement du loess. Le remaniement se traduit par un enrichissement en éléments grossiers (sables fins et sables grossiers) et par la présence de graviers, endogènes pour les meulières grèseuses et exogènes pour le cailloutis pliocène.

On observe d'ailleurs que si l'on exprime la composition granulométrique de ce niveau superficiel 0-80 cm, en fonction non pas de la terre totale mais de la fraction fine (0-50 μ), le résultat obtenu est pratiquement identique à la composition granulométrique des loess proprement dits (par exemple horizon C d'un sol brun lessivé sur loess de Grignon; figure 4).

Le remaniement ne semble pas avoir affecté la composition de cette fraction fine, et sa seule conséquence serait une addition de sables et de graviers.

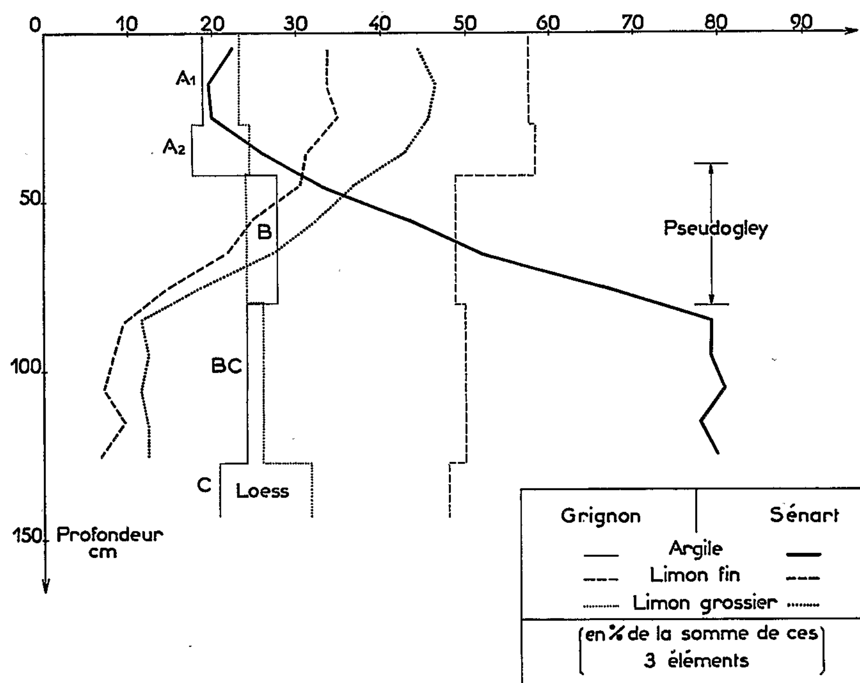


FIGURE 4. — Variations des éléments fins dans le profil. Comparaison avec le sol brun lessivé sur lœss de Grignon.

B. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

On observe donc un accroissement très net du taux d'éléments fins de diamètre inférieur à 2 μ de 30 à 90 cm, profondeurs délimitant sensiblement la zone où se manifeste l'horizon de pseudogley, la base du pseudogley correspondant approximativement au niveau le plus argileux du profil. Pour préciser ce point, il est intéressant d'étudier les rapports existant entre les constituants des diverses classes granulométriques.

En premier lieu, on peut étudier la variation du rapport Sable fin sur Sable grossier qui donne des indications sur l'homogénéité du matériau parental (fig. 5). L'étude de ce rapport se révèle particulièrement intéressante dans le cas présent : alors que les valeurs trouvées oscillent entre 0,7 et 0,8 depuis la surface du sol jusqu'à 80 cm de profondeur, elles passent brutalement à des chiffres supérieurs à 2 dès 80 cm, et sont rapidement croissantes ensuite. Il semble donc que le matériau superficiel de type loessique remanié ait constitué au départ un dépôt relativement homogène sur 80 cm, et qu'il se superpose à un matériau nettement distinct apparaissant à cette profondeur. Sur le terrain, ce passage brusque est en partie masqué par la variation graduelle du taux d'argile, mais l'hypothèse d'une différence de nature des matériaux se trouve confirmée par l'allure de la structure, l'existence d'une ligne de graviers et cailloux à 70-80 cm, et une dominance différente dans la nature des graviers de part et d'autre de cette ligne.

Cette différence de nature des matériaux de part et d'autre de cette ligne de graviers et cailloux apparaît très bien quand on prélève le profil par collage : seule une mince et régulière pellicule de sol adhère au-dessus, alors que des blocs massifs se détachent en dessous.

Pour vérifier l'hypothèse d'une superposition de matériaux différents dans le profil, on a aussi procédé à l'extraction de la fraction argileuse à partir d'échantillons prélevés de 10 en 10 cm. Cette fraction a été étudiée aux Rayons X*. Les résultats obtenus sont les suivants :

10-20 cm : Illite, vermiculite probable, un peu de kaolinite
20-60 cm : Vermiculite, illite, un peu de kaolinite
60-70 cm : essentiellement de l'illite
80-110 cm : Montmorillonite, illite, un peu de kaolinite

On constate que :

— l'illite est présente dans tout le profil, plus particulièrement à sa partie supérieure et de 60 à 70 cm.

— la vermiculite existe dans le niveau supérieur; elle constitue même le minéral dominant entre 20 et 60 cm, mais elle disparaît au-dessous de 80 cm.

— la montmorillonite caractérise le niveau profond (au-dessous de 80 cm). Elle est absente du niveau supérieur.

— la kaolinite est présente en faible quantité dans tout le profil.

Il semble donc se confirmer que le profil étudié est un profil complexe comportant 2 types bien distincts de matériaux : à la partie supérieure, un matériau à dominance de vermiculite et d'illite, à la partie inférieure (au-dessous de 80 cm) un matériau à dominance de montmorillonite.

Pour déterminer dans quelle mesure l'augmentation du taux d'argile visible dans le matériau supérieur loessique, entre 30 et 80 cm, est imputable ou non à un phénomène de lessivage, il faut étudier la distribution des particules de 2 à 2 000 μ indépendamment du taux d'argile, c'est-à-dire

* Analyses effectuées par le laboratoire d'étude des argiles des S. S. C. de l'O. R. S. T. O. M. (Bondy).

en ramenant à 100 la somme limon + limon grossier + sables totaux. S'il y a lessivage dans un matériau initialement homogène (comme tend à le prouver le rapport Sable fin / Sable grossier), cette distribution doit être constante sur toute la profondeur affectée par le phénomène de lessivage ou d'entraînement de l'argile. Le calcul (voir tableau II) montre qu'il en est effectivement ainsi sur l'épaisseur 0-50 cm, mais que les proportions relatives des divers constituants changent à partir de 50 cm : on note la diminution progressive et sensible des éléments 2-50 μ, avec augmentation corrélative des taux de sables fins et grossiers.

TABLEAU II

Rapports des fractions granulométriques

Profondeurs (en cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{SF}{SG}$	0,78	0,73	0,72	0,75	0,67	0,61	0,71	0,72	2,16	2,61	4,27	5,41	11,3
$\frac{LF + LG}{A}$	3,49	4,11	4,09	2,88	2,06	1,32	0,93	0,50	0,27	0,26	0,21	0,28	0,24
$\frac{SF + LG}{SG}$	2,01	2,00	1,95	2,01	1,94	1,61	1,69	1,26	2,74	3,13	4,97	6,25	12,76
A + L + LG	61,0	60,8	61,1	62,8	67,4	65,9	68,2	62,6	61,5	53,8	53,0	51,3	48,3

Dans ces conditions, s'il existe bien une augmentation régulière et importante du taux de l'argile entre 30 et 90 cm, le phénomène de lessivage de l'argile (ou de son entraînement) ne contribue que pour une part à l'explication des faits observés. Ce phénomène intervient certainement entre 30 et 50 cm de profondeur, mais un processus différent se superpose au précédent de 50 à 70-80 cm de profondeur. On remarque en effet une symétrie frappante des profils représentant d'une part la teneur en argile, d'autre part le taux d'éléments limon fin + limon grossier (2-50 μ). Il apparaît donc qu'une partie de l'argile existant entre 50 et 80 cm de profondeur s'est formée par altération des particules de limon 2-50 μ sous l'effet de l'hydromorphie annuelle temporaire et de ses conséquences.

Ce fait se manifeste par la forme très caractéristique du profil du rapport

$$\frac{\text{Limon fin + Limon grossier}}{\text{Argile}} \quad \text{(fig. 5).}$$

Ce rapport passe de la valeur 4, entre 0 et 30 cm, à la valeur 0,5 à 80 cm. On observe, en outre, à l'appui de cette hypothèse la diminution, entre 35 et 80 cm, c'est-à-dire exactement dans l'horizon de pseudogley, du rapport

$$\frac{\text{Sable fin + Limon grossier}}{\text{Sable grossier}}$$

qui traduit une certaine altération des particules de 50 à 200 μ sous l'effet de l'hydromorphie.

Pour ce qui est du sol en dessous de 80 cm, nous voyons sur la figure 3 (texture des divers horizons du profil) que, de 80 à 130 cm, on a une diminution de 10 % de la fraction argileuse au profit de la fraction sableuse, les limons ne variant pratiquement pas. De 130 à 180 cm, le sol

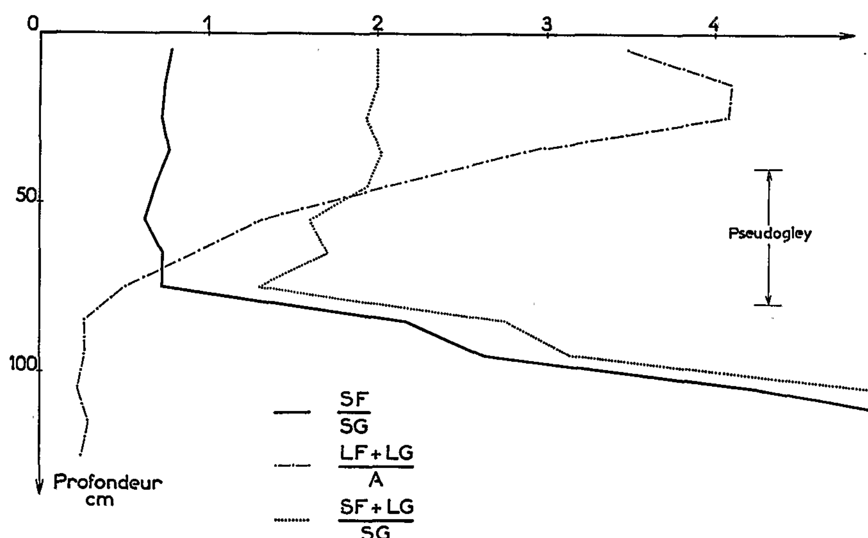


FIGURE 5. — Evolution de quelques rapports granulométriques en fonction de la profondeur.

est de moins en moins sableux, d'abord au profit des limons jusqu'à 150 cm, puis de la somme argile + limon ensuite.

Tout se passe comme si l'horizon de cailloutis situé à 80 cm était le vestige d'une ancienne surface en dessous de laquelle on retrouverait un horizon appauvri en argile. La variation de la nature minéralogique des argiles précédemment signalée et, comme nous le verrons plus loin, l'augmentation marquée du carbone à 80 cm, paraissent confirmer cette hypothèse.

En **conclusion**, il apparaît que le sol actuel s'est formé sur un matériau d'origine loessique plus ou moins remanié, mais probablement homogène à l'origine, dont l'épaisseur est de l'ordre de 80 cm, et qui repose sur un niveau mis en place antérieurement. Un certain lessivage d'argile apparaît dans l'horizon supérieur, avec une accumulation corrélative à partir de 30 cm. Le niveau argileux sous-jacent est à l'origine des phénomènes d'hydromorphie temporaire qui déterminent les processus saisonniers de fermentation anaérobies et l'apparition d'un horizon de pseudogley dans le matériau loessique. Sous l'effet de cette gleyification, le loess remanié subit une altération sensible se traduisant, entre 50 et 80 cm, par une formation d'argile, essentiellement à partir des particules de limon fin et de limon grossier. Les sables eux-mêmes subissent une légère altération. L'intensité du phénomène de dégradation est d'autant plus marquée que la durée de l'engorgement est plus longue, et donc que l'on se rapproche du plancher de la nappe situé vers 80-90 cm. L'hydromorphie n'affecte pas de façon visible les 30 cm supérieurs du sol qui présentent cependant très facilement des zones de réduction (cf. morphologie du profil).

Il paraît difficile, entre 50 et 80 cm de profondeur, d'apprécier les contributions respectives des phénomènes de lessivage (ou d'entraînement) de l'argile et d'altération des limons dans l'accroissement du taux d'argile, mais il semble indiscutable que le second de ces processus contribue au moins partiellement à cet accroissement. Si toutefois on se base sur la similitude de composition des fractions 0-50 μ dans les horizons supérieurs du sol de la forêt de Sénart et dans ceux du sol lessivé sur loess de Grignon (fig. 4), il semblerait que l'accumulation proprement dite d'argile n'ait guère dépassé les teneurs observées dans la forêt de Sénart vers 50 cm, soit 25 % environ. Il faudrait alors admettre une néoformation d'argile de l'ordre de 20-25 % à la base de l'horizon du pseudogley.

V. — MATIERE ORGANIQUE

Les teneurs en carbone ont été déterminées mensuellement par la méthode Walkley et Black pendant 18 mois consécutifs dans les 20 cm supérieurs du sol, par tranches de 5 cm d'épaisseur. On observe un forte dispersion des chiffres obtenus dans la tranche 0-5 cm, alors que la variabilité est nettement moindre à partir de 5 cm et diminue avec la profondeur. Les résultats obtenus peuvent être résumés sous forme du tableau suivant III :

TABLEAU III
Variabilité de la teneur en carbone.

	Teneur en carbone %				
Couche	1er Décile	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	9ème Décile
0– 5 cm	6,5	7,7	8,6	9,5	10,3
5–10 cm	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2
10–15 cm	1,7	1,8	1,9	2,1	2,2
15–20 cm	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7

TABLEAU IV
Matière organique, Carbone et Azote

Profondeurs	C %	N ‰	C/N	MO %
0– 10 cm	4,22	2,146	19,7	7,3
10– 20 cm	2,44	1,040	23,5	4,2
20– 30 cm	1,50	0,593	25,3	2,6
30– 40 cm	1,11	0,487	22,8	1,9
40– 50 cm	0,60	0,333	18,0	1,0
50– 60 cm	0,37	0,280	13,2	0,6
60– 70 cm	0,29	0,260	11,2	0,5
70– 80 cm	0,37	0,333	11,1	0,6
80– 90 cm	*0,65*	*0,407*	*16,0*	*1,1*
90–100 cm	0,40	0,306	13,1	0,7
100–105 cm	0,25	0,226	11,1	0,4
105–110 cm	0,48	0,293	16,4	0,8
110–120 cm	0,25	0,193	13,0	0,4
120–130 cm	0,24	0,220	10,9	0,4
130–140 cm	0,18	0,200	9,0	0,3
140–150 cm	0,16	0,167	9,6	0,3
150–160 cm	0,17	0,173	9,8	0,3
160–170 cm	0,14	0,186	7,5	0,2
170–180 cm	0,14	0,167	8,4	0,2
180–190 cm	0,05	0,127	3,9	0,1
190–200 cm	0,14	0,266	5,3	0,2

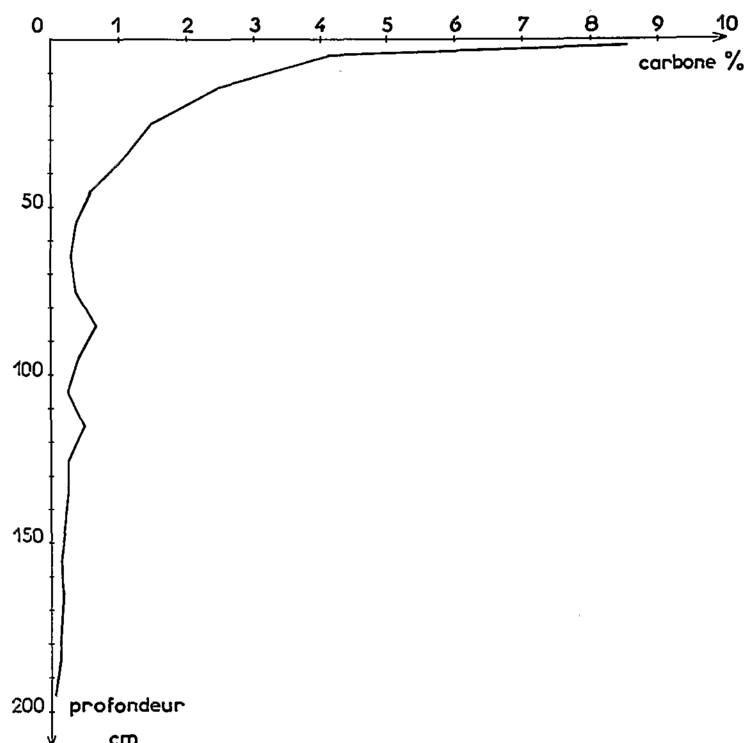


FIGURE 6. — Répartition du carbone dans le profil.

Il y a donc une très forte accumulation de matière organique (15 % environ) dans les 5 cm supérieurs du sol, mais cette teneur s'abaisse très rapidement, puisqu'elle est déjà inférieure à 2,5 % vers 20 cm de profondeur.

Les dosages effectués en profondeur (sur un seul profil) ont montré que la décroissance du taux de carbone est continue, à deux petites irrégularités près (cf. tabl. IV et fig. 6).*

La présence dans l'horizon 80-90 cm d'une teneur en matières organiques légèrement plus forte et moins évoluée (rapport C/N de 16) que dans les horizons voisins, confirme l'hypothèse émise précédemment de l'existence d'un sol enterré à ce niveau.

VI. — STRUCTURE

La structure du sol de la forêt de Sénart a été décrite précédemment (voir chapitre morphologie). On a tenté d'y apporter quelques précisions, d'une part en procédant à des mesures de densité apparente et de densité réelle du sol, pour définir la porosité totale du sol, d'autre part en étudiant la stabilité structurale.

* Les valeurs de carbone données dans ces documents ont été obtenues par la méthode de Anne qui attaque à chaud la matière organique, aussi sont-elles légèrement supérieures à celles du tableau III obtenues par la méthode de Walkley et Black qui, elle, attaque à froid la matière organique.

A. — DENSITÉ APPARENTE, DENSITÉ RÉELLE ET POROSITÉ TOTALE

Les mesures de densité apparente ont été réalisées par la méthode du cylindre. Les prélèvements ont été effectués en juillet 1968 à diverses profondeurs et avec 3 répétitions. Les mêmes échantillons ont été utilisés ensuite pour la détermination de la densité réelle par la méthode du pycnomètre. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant V :

TABLEAU V
Densités à différentes profondeurs

Profondeur	Densité apparente	Densité réelle
0–10 cm	1,05	2,52
10–20 cm	1,10	2,57
20–30 cm	1,20	2,60
30–40 cm	1,30	2,69
40–50 cm	1,38	2,65
50–60 cm	1,30	2,67
60–70 cm	1,40	2,68
70–80 cm	1,35	2,66

On constate que les valeurs de la densité apparente sont satisfaisantes, en particulier en surface, et que celles de la densité réelle sont normales.

La porosité totale du sol, exprimée en volume % peut être calculée à partir de ces données, selon la formule $P\,\% = 100\left(I - \frac{da}{dr}\right)$, da et dr désignant respectivement la densité apparente et la densité réelle.

Il est également possible de transformer les chiffres obtenus pour cette porosité en teneur en eau % à saturation (tabl. VI) :

TABLEAU VI
Porosité totale et humidité à saturation

Profondeur	Porosité en volume %	Teneur en eau à saturation %
0–10 cm	58	56
10–20 cm	57	52
20–30 cm	54	45
30–40 cm	52	40
40–50 cm	48	35
50–60 cm	51	39
60–70 cm	48	34
70–80 cm	49	36

On peut donc considérer que la porosité du sol de la forêt de Sénart est satisfaisante dans les 20 cm supérieurs du sol, moyenne ensuite. On peut également noter que, en supposant le sol totalement gorgé d'eau, la quantité d'eau totale retenue alors par le sol serait de 220 mm sur les 40 cm supérieurs, de 320 mm sur la tranche 0-60 cm, et de 417 mm pour le niveau 0-80 cm.

B. — STABILITÉ STRUCTURALE

Les mesures de stabilité structurale effectuées sur le sol de la forêt de Sénart ont eu deux objectifs différents : la détermination de la stabilité structurale à diverses profondeurs dans le profil, et l'étude des variations de la stabilité structurale des horizons superficiels dans le temps.

La méthode utilisée est celle préconicée par S. HENIN *et al.* (1958).

1) Stabilité structurale des divers horizons.

En ce qui concerne la stabilité structurale des divers horizons du profil, les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit (fig. 7).

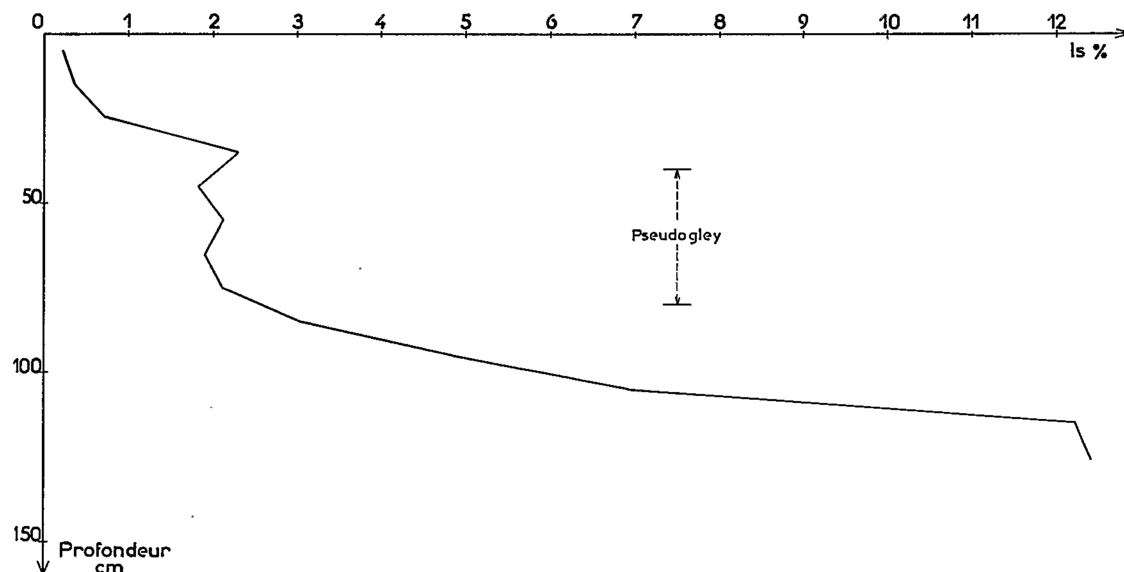


FIGURE 7. — Indice d'instabilité structurale — Variation dans le profil.

a) En surface, les valeurs de l'indice d'instabilité Is sont très basses, ce qui traduit en principe une grande stabilité. Il semble toutefois que les chiffres obtenus ne correspondent pas à la réalité, et soient la conséquence directe de l'impossibilité de réhumectation des échantillons riches en matière organique mal décomposée et acide, après séchage à l'air. On constate en effet que les taux d'agrégats stables à l'eau sont toujours très élevés, et qu'en particulier, ceux obtenus après

prétraitement au benzène sont systématiquement plus élevés que ceux obtenus sans prétraitement ou avec prétraitement à l'alcool*.

Bien que cette mesure n'ait pas de signification physique définie, on a procédé à des déterminations des fractions agrégées stables à l'eau sur des échantillons conservés humides après le prélèvement : on observe alors une chute brutale des pourcentages des fractions agrégées et une remontée considérable de l'indice d'instabilité, en particulier en hiver, ce qui tend à prouver l'importance déterminante de la dessiccation du sol sur la stabilité.

b) Dès 30 cm de profondeur, l'indice d'instabilité augmente rapidement : il atteint une valeur de l'ordre de 2,0 à 40 cm de profondeur.

c) La valeur de Is demeure constante et voisine de 2,0 sur toute l'épaisseur de l'horizon de pseudogley.

d) A partir de 80 cm, base du pseudogley, se produit une augmentation très rapide et très régulière de Is dont la valeur dépasse 12 à 120 cm de profondeur.

e) L'évolution dans le profil des fractions agrégées stables à l'eau sans prétraitement ou après prétraitement à l'alcool est caractéristique : les taux d'agrégats stables, assez élevés en surface, diminuent rapidement et passent par un minimum entre 20 et 40 cm de profondeur. Puis, ils augmentent dans le pseudogley et diminuent ensuite au-dessous de cet horizon (fig. 8).

L'horizon de pseudogley est donc caractérisé par une stabilité relative élevée des agrégats stables à l'eau, ce qui traduit probablement une cohésion particulièrement élevée des éléments structuraux de cet horizon.

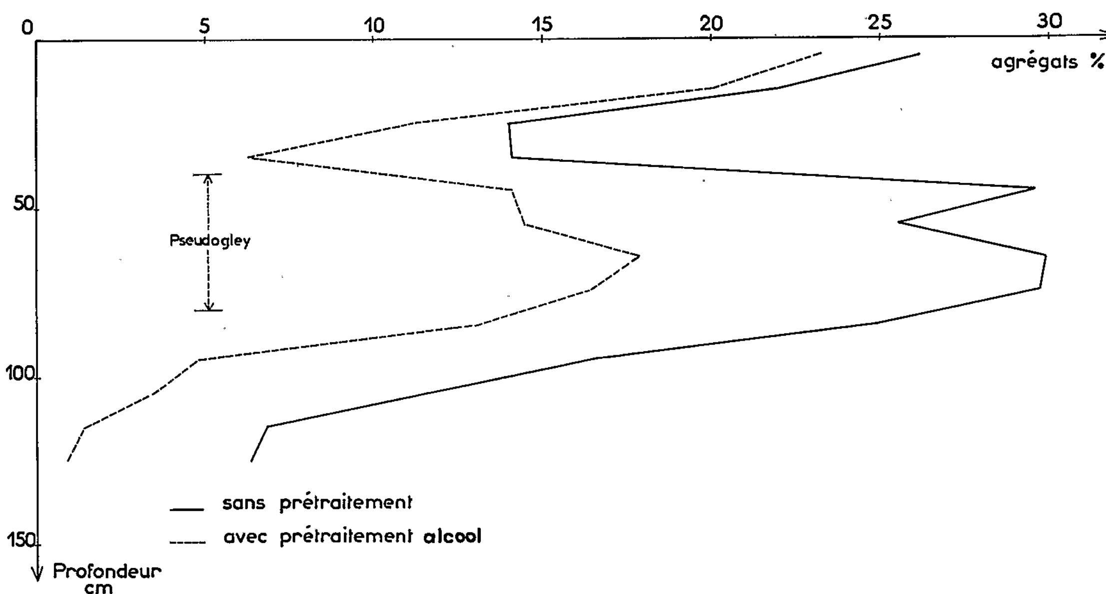


FIGURE 8. — Fractions agrégées stables — Variations dans le profil.

* Rappelons que, en règle générale, après prétraitement au benzène, les agrégats stables à l'eau tendent à diminuer et ceci d'autant plus que la teneur en matière organique est plus faible. Par contre, les taux d'agrégats stables à l'eau, après prétraitement à l'alcool, sont le plus souvent égaux ou supérieurs à ceux obtenus sans prétraitement.

f) En ce qui concerne la dispersabilité des éléments fins 0-20 μ, on observe une progression régulière du taux de ces éléments de la surface jusqu'à 80 cm de profondeur (de 6 à 40 %), puis une stabilisation au voisinage de 40 %. Cette évolution se traduit par une augmentation continue du rapport $\frac{A + L \text{ dispersé}}{A + L \text{ total}}$ de la surface vers la profondeur, ce rapport passant de 20 % en surface à 80 % vers 90 cm et à 100 % vers 130 cm. C'est cette très forte aptitude à la dispersion des horizons situés sous le pseudogley qui détermine leur très mauvaise stabilité structurale, et provoque sans doute leur totale imperméabilité.

2) Variations saisonnières de la stabilité structurale des horizons superficiels.

Des déterminations mensuelles de l'indice Is ont été effectuées pendant 18 mois consécutifs sur les couches 0-5, 5-10, 10-15 et 15-20 cm. Sur ces 4 couches, les résultats obtenus sont les suivants (fig. 9) :

a) La variation saisonnière de l'indice d'instabilité structurale n'est pas perceptible en surface, ou bien elle demeure inférieure à l'erreur analytique, ce qui est normal, compte tenu de la valeur moyenne très basse de Is à ce niveau (moyenne annuelle = 0,20).

b) Par contre, une variation saisonnière de Is se dessine dès 5 cm de profondeur et elle est d'autant plus sensible que l'horizon étudié est plus profond. Par exemple, pour l'horizon 10-20 cm, l'amplitude de variation de Is de part et d'autre de la moyenne annuelle est de l'ordre de 50 % de cette valeur moyenne (0,43) (fig. 9).

c) Le maximum de stabilité se situe de juin à août, le minimum de décembre à avril. Une évolution analogue avait été mise en évidence sur un type de sol tout différent de la région parisienne (sol brun calcaire), les maxima et minima de stabilité se situant exactement aux mêmes périodes (COMBEAU, 1965).

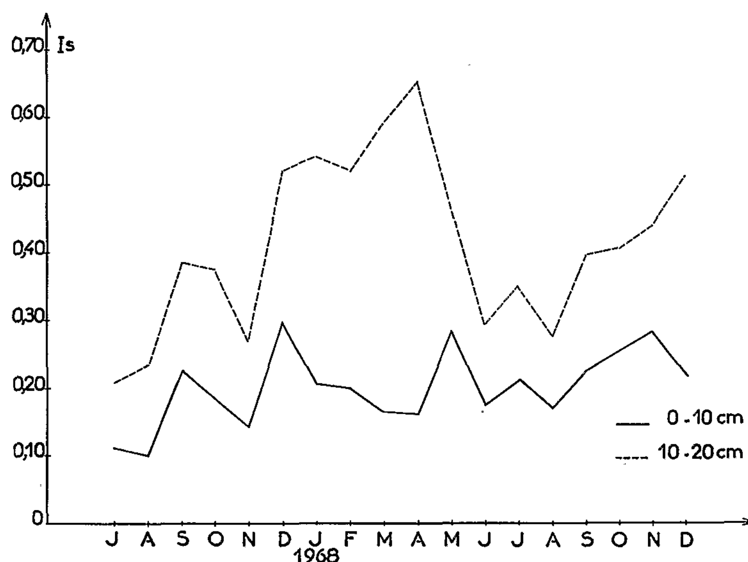


FIGURE 9. — Variations saisonnières de l'indice d'instabilité structurale Is.

VII. — RELATIONS SOL - EAU

A. — CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES (pF)*

Les 13 échantillons prélevés dans le profil étudié ont été soumis à des mesures de pF, selon les méthodes conventionnelles d'extraction de l'eau sous pression. Les résultats obtenus pour les pF 4,2, 3,0, 2,5 et 2,0 sont représentés sur la figure 10.

On constate au premier examen :

a) Que les profils de teneur en eau aux divers pF sont approximativement parallèles entre eux, ce qui est normal.

b) Que ces profils ont une forme rappelant celle de la distribution des éléments fins, plus particulièrement de l'argile 0-2 μ, sauf dans les 20 cm supérieurs du sol par suite du rôle de la

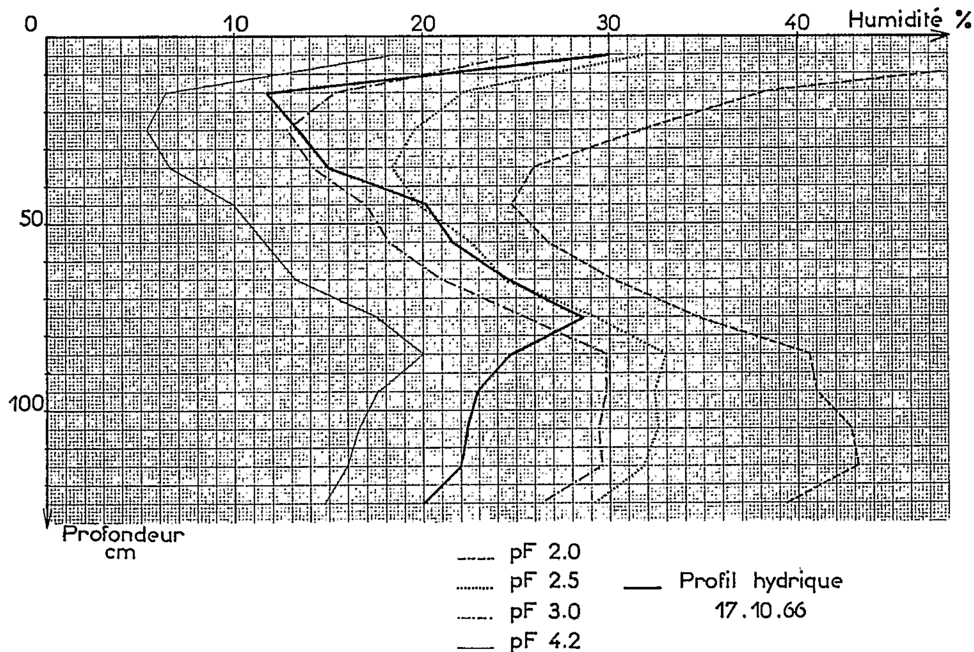


FIGURE 10. — Teneur en eau du profil aux différents pF (sur terre préalablement séchée).

* La notation pF correspond au logarithme de l'énergie de rétention de l'eau par le sol. Cette énergie est déterminée par extraction, sous des pressions connues, de l'eau des échantillons de sols préalablement saturés.

Les pF 4,2, 3,0, 2,5 et 2,0 correspondent respectivement à des énergies de rétention de 16 000, 1 000, 320 et 100 g/cm².

Le *point de flétrissement permanent correspond* à pF 4,2 et on verra plus loin que, dans les sols de la forêt de Sénart, le taux d'humidité au ressuyage se situe au voisinage de pF 2,3.

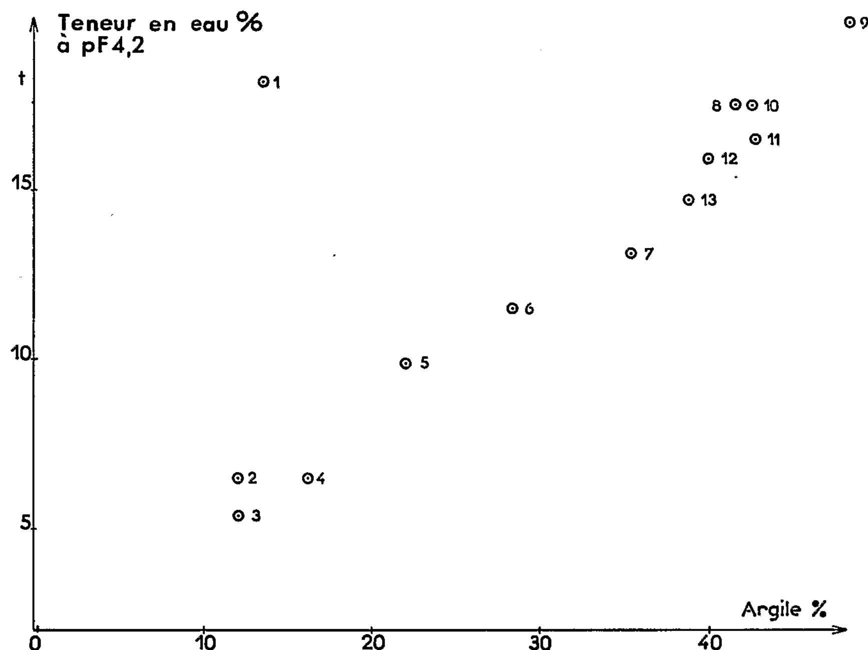


FIGURE 11. — Corrélation entre la teneur en eau à pF 4,2 et le taux d'argile.

matière organique dans la rétention de l'eau. La corrélation entre la teneur en eau à un pF déterminé et le taux d'argile est donc étroite (fig. 11).

c) Que le minimum de rétention d'eau se situe à 20-30 cm de profondeur pour les pF 4,2 et 3,0, à 30-40 cm pour les pF 2,5, et à 40-50 cm pour les pF 2,0. Il s'ensuit nécessairement une réduction relative de porosité qui intervient entre 30 et 50 cm. Rappelons à ce sujet que le diamètre équivalent moyen des pores occupés par l'eau se situe au voisinage de 0,2 μ pour pF 4,2, 3 μ pour pF 3.0, 10 μ pour pF 2,5 et 30 μ pour pF 2,0.

L'étude plus approfondie des résultats fait ressortir les conclusions suivantes :

a) La différence de teneur en eau entre pF 4,2 et pF 2,0 présente effectivement des valeurs minimales entre 40 et 80 cm, donc exactement dans le pseudogley. La porosité totale (exprimée en poids) est donc minimum dans cet horizon.

b) Entre pF 4,2 et pF 2,5, ce phénomène se manifeste avec une faible intensité : la microporosité (de 0,2 à 10 μ) est donc très légèrement plus faible dans la zone affectée par l'engorgement.

c) Par contre, entre pF 2,5 et pF 2,0, la différence des rétentions d'eau est nettement accusée. C'est donc surtout une fraction de la macroporosité qui est affectée par l'hydromorphie, ce qui réduit la quantité d'eau retenue dans les pores de 10 à 30 μ.

On peut donc considérer d'après ces résultats que l'hydromorphie du sol étudié se caractérise par une réduction de la porosité totale, et surtout de la macroporosité, dans l'horizon de pseudogley. Ce fait se traduit dans la forme des courbes « pF — humidité des échantillons », pratiquement rectilignes entre pF 4,2 et pF 2,0 pour les échantillons provenant de l'horizon de pseudogley, alors qu'elles s'incurvent sensiblement entre pF 2,5 et pF 2,0 pour les échantillons prélevés à d'autres niveaux.

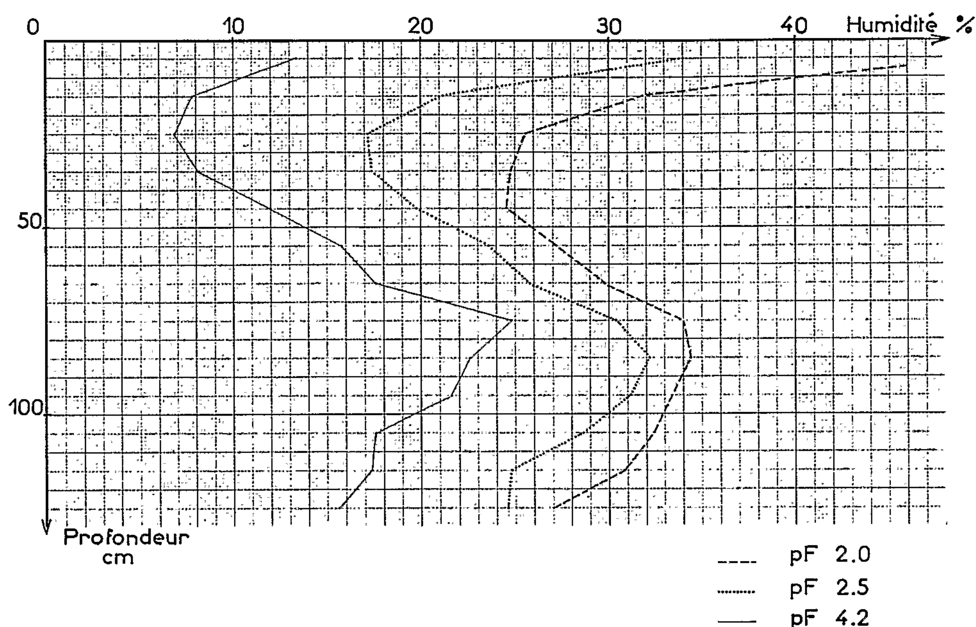


FIGURE 12. — Teneur en eau du profil aux différents pF (sur terre conservée humide).

Il faut toutefois se rappeler que les résultats ci-dessus ont été obtenus à partir d'analyses réalisées en laboratoire, selon une méthode conventionnelle de détermination du pF sur échantillons séchés et tamisés. Pour limiter les erreurs d'interprétation, il pouvait être intéressant de recouper ces résultats par d'autres, obtenus selon des techniques différentes. C'est pourquoi les analyses de pF ont été ensuite exécutées sur terre à l'humidité du prélèvement et non tamisée, pour écarter les problèmes liés à la difficulté de réhumectation des échantillons (fig. 12).

Les mesures de pF sur terre humide conduisent effectivement à des chiffres différents de ceux obtenus sur terre séchée et tamisée. On observe en particulier les faits suivants :

a) à pF 4,2, les taux d'humidité obtenus sont toujours plus élevés sur terre conservée humide que sur terre séchée et tamisée. Le décalage, qui est de l'ordre de 1,5 % entre 10 et 30 cm de profondeur, augmente dans le pseudogley pour atteindre 7 % en valeur absolue à la base de cet horizon, puis diminue dans le niveau sous-jacent.

b) à pF 2,5, les taux d'humidité sont très voisins dans les deux cas pour les horizons compris entre 0 et 80 cm. Au delà de cette profondeur, les pF sur sol humide sont plus bas que sur terre séchée à l'air et tamisée.

c) à pF 2,0, les taux d'humidité sur terre humide sont plus bas que sur terre séchée, sauf dans l'horizon de pseudogley où ils sont identiques.

Par conséquent, dans l'ensemble, les courbes pF — humidité, sur sol conservé humide, présentent une pente plus forte que celles obtenues sur sol préalablement séché, ce qui équivaudrait à une gamme d'eau utile plus étroite sur sol humide que sur sol sec. C'est ce qui apparaît dans le tracé des profils de porosité (teneurs en eau dans les capillaires de 0,2 à 3 μ et de 10 à 20 μ calculées d'après les différences pF 2,0 — pF 4,2 et pF 2,0 — pF 2,5) (fig. 13).

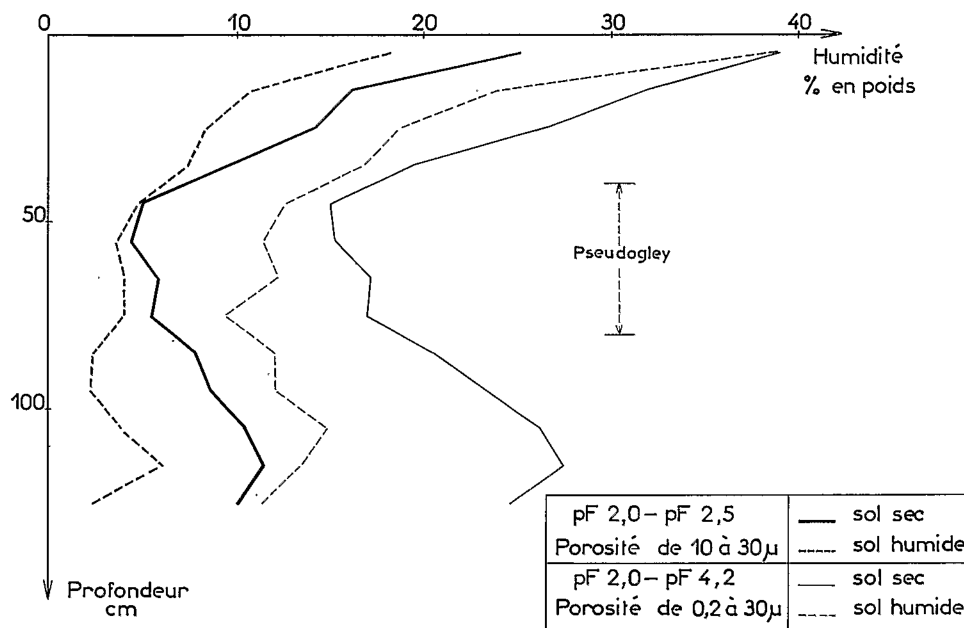


FIGURE 13. — Porosité différentielle — Variation dans le profil.

On note, comme sur sol sec, une forte réduction de la porosité totale et de la macroporosité de la surface jusque vers 50 cm de profondeur, mais on n'observe plus d'augmentation sensible de porosité au-dessous de 80 cm. Ce résultat semble à priori plus logique que celui obtenu à partir des mesures sur terre séchée, pour lesquelles une cause de perturbation réside dans le gonflement des argiles lors de la réhumectation, en particulier au-dessous de 90 cm (dominance de montmorillonite).

On est donc amené à la conclusion que la porosité totale et plus particulièrement la macroporosité subissent une très forte réduction entre la surface du sol et la profondeur 50 cm environ, et qu'elles se maintiennent à des valeurs très faibles dans le pseudogley et probablement au-dessous de cet horizon.

B. — PROFILS HYDRIQUES ET ÉVOLUTION ANNUELLE DE L'HUMIDITÉ

La connaissance des profils de teneur en eau aux divers pF peut être intéressante pour interpréter les variations du taux d'humidité à différents niveaux au cours de l'année, ce qui a incité à établir des profils hydriques à différentes époques au voisinage immédiat du point d'étude. Les dates d'établissement de ces profils ont été choisies de façon à respecter une périodicité de l'ordre de 1 mois entre 2 prélèvements consécutifs. L'étude a porté sur une période de 14 mois entre février 1968 et avril 1969. Les prélèvements ont été effectués à la tarière par tranches de 10 cm, jusqu'à 80 cm de profondeur ou plus, selon les époques de l'année.

Les résultats des dosages d'humidité figurent sur le tableau VII et sont représentés graphiquement sur les figures 14 et 15; ils sont exprimés en taux d'humidité réel, c'est-à-dire rapportés à la terre fine 0-2 mm. Ces résultats suggèrent un certain nombre de remarques :

1) La forme des profils demeure sensiblement la même tout au long de l'année. On observe :

a) un maximum du taux d'humidité en surface du sol. Ce maximum est de l'ordre de 38 à 45 % en hiver et au printemps, de 14 à 24 % en été.

b) un minimum entre 30 et 40 cm, c'est-à-dire juste au-dessus du pseudogley. Ce minimum est de 18 à 21 % en hiver et au printemps, de 6 à 12 % en été et en automne.

c) une remontée du taux d'humidité dans l'horizon de pseudogley, avec un second maximum apparaissant le plus souvent vers 80-90 cm de profondeur.

d) une nouvelle diminution de la teneur en eau à partir de 90 cm, avec stabilisation à partir de 110 cm au voisinage de 16 à 20 % d'humidité.

2) Un phénomène très caractéristique doit être signalé : si l'on écarte l'horizon superficiel 0-10 cm, on constate qu'il existe sur le graphique des profils hydriques (fig. 14), une gamme de teneurs en eau séparant très nettement 2 groupes de profils : d'une part, du côté des fortes teneurs,

TABLEAU VII

Taux d'humidité aux différentes dates de prélèvement

	15.2 1968	14.3	19.4	5.6	3.7	20.8	12.9	15.10	14.11	20.12	15.1 1969	14.2	3.4
0– 10 cm	44,8	29,3	37,9	43,0	23,7	21,6	17,0	31,6	40,0	41,9	40,3	49,1	41,9
10– 20 cm	28,5	26,4	25,9	29,4	17,2	14,9	10,8	16,3	20,8	20,3	26,6	25,6	29,0
20– 30 cm	21,9	21,9	20,4	19,8	13,9	8,5	6,8	11,9	16,4	14,6	21,5	20,1	23,8
30– 40 cm	20,8	21,0	20,6	18,2	11,9	6,7	5,8	8,7	11,1	13,7	18,0	19,0	19,2
40– 50 cm	23,9	22,2	21,7	19,3	11,5	7,1	6,7	9,8	10,5	12,0	19,3	19,5	20,8
50– 60 cm	29,8	24,2	22,6	22,1	15,0	8,2	10,0	11,9	13,3	13,6	20,8	20,9	23,5
60– 70 cm		27,1	24,7	24,7	17,0	15,1	14,3	18,2	15,8	19,4	23,2	25,2	23,7
70– 80 cm		26,5	27,1	25,6	18,7	18,3	18,2	17,8	20,4	22,7	23,6	30,2	26,5
80– 90 cm		26,0		24,8	21,8	20,6	18,7	20,5	20,2		23,9	27,4	34,7
90–100 cm		26,8		22,8	18,4	18,9	19,3	15,4			23,7	23,2	32,6
100–110 cm		22,8		21,0		18,5	18,2	18,1			20,3	20,2	29,6
110–120 cm		20,4				15,5	17,0	17,2			19,9	20,0	27,8
120–130 cm		20,3				16,3	18,4	17,3				16,4	
130–140 cm		18,9				17,2	18,4	16,5				14,5	
140–150 cm		20,0				17,5	20,6	17,7					
150–160 cm		20,2				17,2	19,3	17,1					
160–170 cm		21,8				17,0	16,8	15,7					
170–180 cm		22,2				17,5	16,7	15,7					
180–190 cm		20,1				19,4	16,3						
190–200 cm		19,4				23,4	19,0						
200–210 cm						26,7							
Moyennes													
20– 40 cm	21,3	21,4	20,5	19,0	12,9	7,6	6,3	10,3	13,7	14,1	19,7	19,6	21,5
40– 60 cm	26,8	23,2	22,1	20,7	13,2	7,6	8,3	10,8	11,9	12,8	20,0	20,2	22,1
60– 80 cm		26,8	25,9	25,1	17,8	16,2	16,2	18,0	18,1	21,0	23,4	27,7	25,1

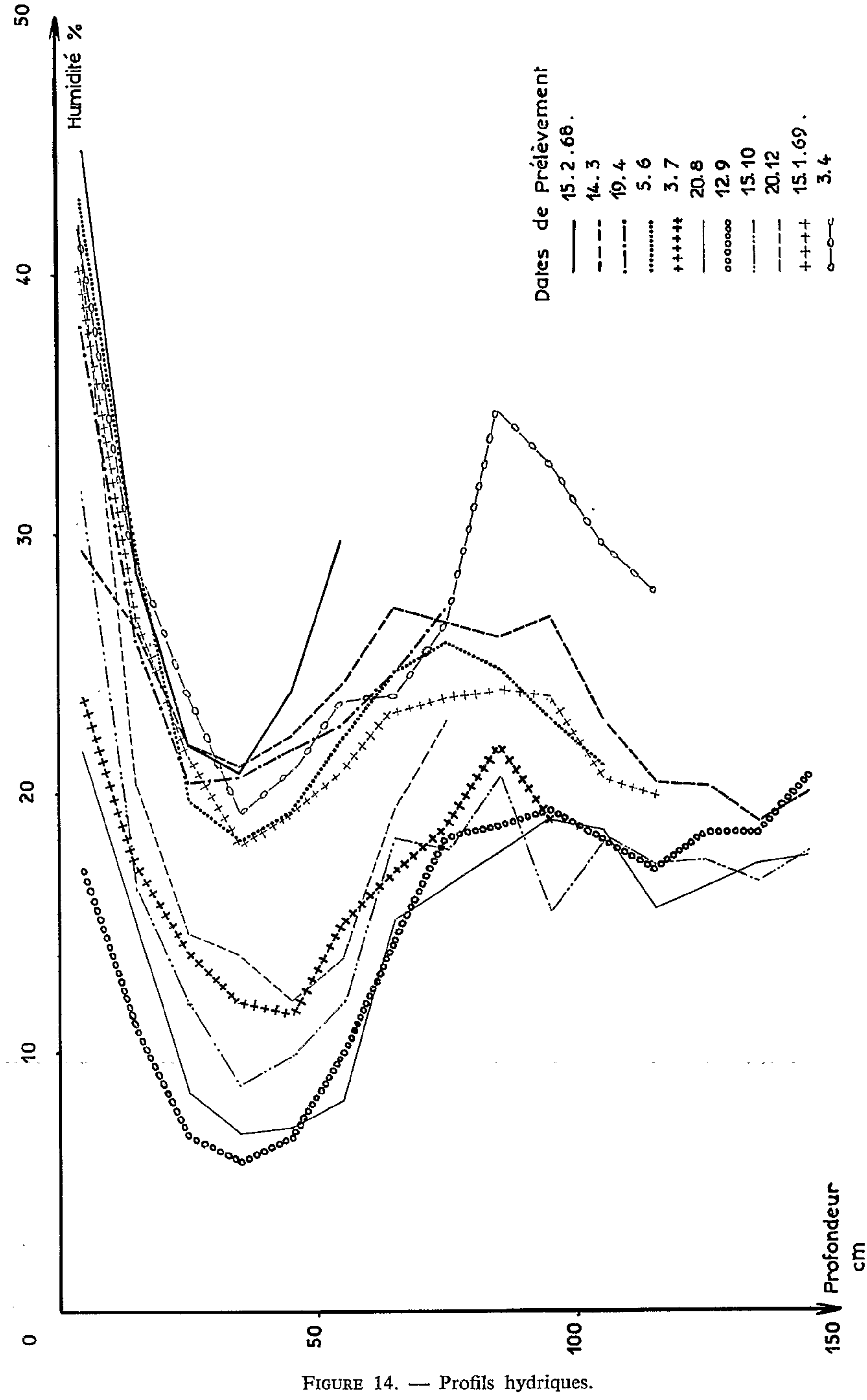


FIGURE 14. — Profils hydriques.

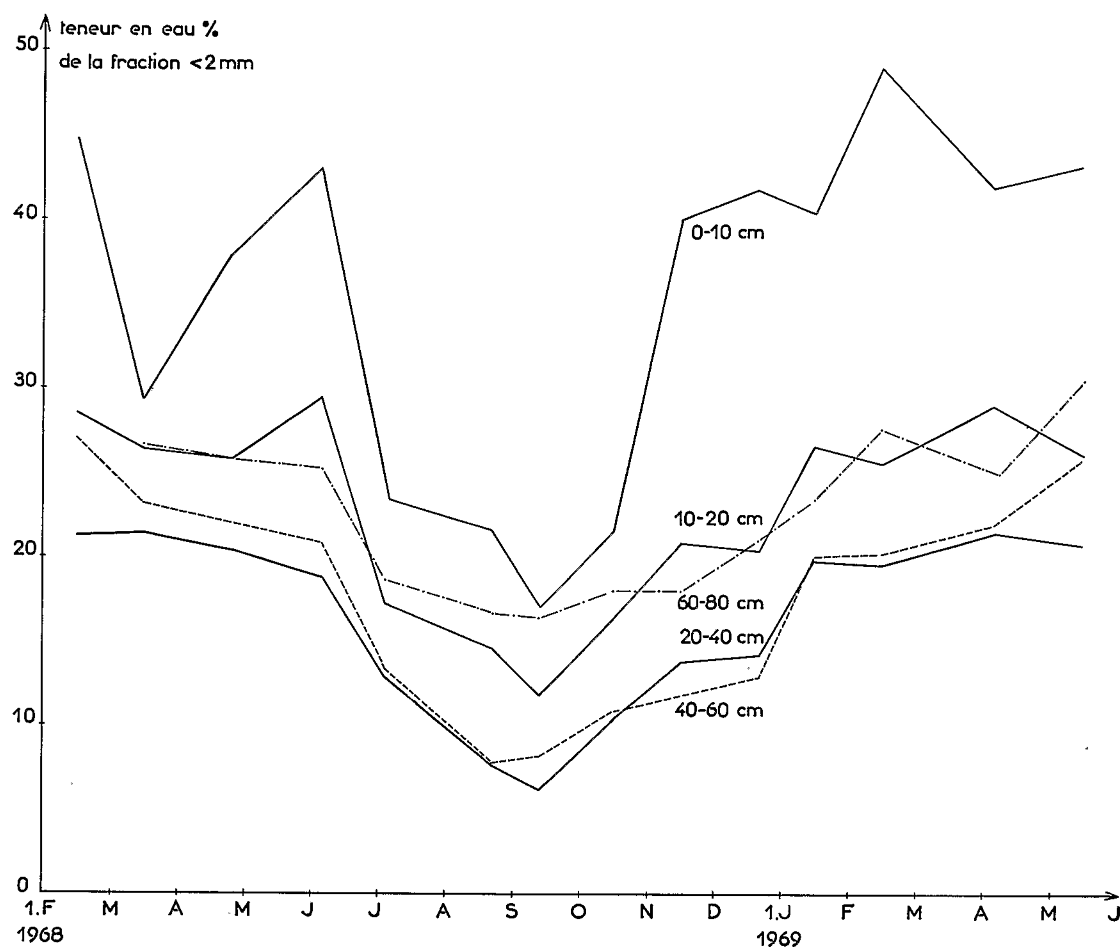


FIGURE 15. — Variations saisonnières de la teneur en eaux à différentes profondeurs.

TABLEAU VIII

Evolution du stock total d'eau du sol (en mm)

	20.2 1968	15.3	18.4	7.6	3.7	20.8	12.9	15.10	16.11	20.12	15.1 1969	14.2	3.4
0–40 cm	132	113	120	125	76	58	46	77	99	102	121	129	130
0–60 cm	203	176	179	180	111	79	68	106	131	136	174	183	189
0–80 cm		249	250	250	160	124	112	155	180	194	239	259	258

les profils obtenus de janvier à juin, d'autre part, du côté des basses humidités, les profils de juillet à décembre. La gamme de teneur en eau séparant ces 2 groupes de profils hydriques est la suivante :

10-20 cm	21 à 25 %
20-30 cm	16 à 20 %
30-40 cm	14 à 18 %
40-50 cm	12 à 19 %
50-60 cm	16 à 21 %
60-70 cm	19,5 à 23 %
70-80 cm	20,5 à 23,5 %

Au-dessous de 80 cm, la distribution entre les 2 groupes de profils hydriques s'estompe, et les différences entre été et hiver sont apparemment très faibles à partir de 120 cm.

Il y aurait donc, dans les 80 cm supérieurs du sol, deux « états hydriques » sensiblement différents l'un de l'autre, l'un d'hiver et de printemps, l'autre d'été et d'automne. Le passage d'un état à l'autre se ferait rapidement, et sans transition sensible.

3) A l'intérieur de chaque groupe de profils, des différences apparaissent qui traduisent le dessèchement ou la réhumectation à l'intérieur de chacune des 2 périodes étudiées. C'est ainsi que le profil le plus sec est celui du 12 septembre 1968.

4) Pour avoir une vue d'ensemble de l'évolution de l'humidité du sol au cours de la période considérée, on peut traduire cette humidité sur une épaisseur donnée de sol en hauteur d'eau équivalente. Il suffit pour cela de faire le produit (taux d'humidité × densité apparente)* pour obtenir la hauteur d'eau en mm correspondant à la teneur en eau de chaque tranche de 10 cm de sol. Connaissant les valeurs de la densité apparente aux diverses profondeurs, nous avons effectué ce calcul pour les couches de sol 0-40, 0-60 et 0-80 cm. On obtient ainsi les valeurs du stock total d'eau du sol sur l'épaisseur considérée et aux diverses dates de prélèvement. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau VIII et figurent sur le graphique 16.

On constate donc l'existence d'une évolution nette et régulière du stock d'eau du sol au cours de l'année. Ce stock présente une valeur maximum pratiquement constante en hiver (120-130 mm sur 40 cm, 175-190 mm sur 60 cm, 250-260 mm sur 80 cm). Au cours du mois de juin, ce stock s'abaisse rapidement pour atteindre une valeur minimum en septembre (46 mm sur 40 cm, 68 mm sur 60 cm, 112 mm sur 80 cm), puis il se reconstitue progressivement. On peut remarquer au passage que le calcul du stock total d'eau, en supposant que la totalité du profil a atteint le point de flétrissement, conduit aux valeurs suivantes :

0-40 cm	42 mm
0-60 cm	79 mm
0-80 cm	137 mm

Par conséquent, en août et septembre, seule la couche 0-40 cm est encore susceptible de libérer un peu d'eau pour les végétaux, alors que l'horizon de pseudogley atteint un taux d'humidité sensiblement inférieur au point de flétrissement. On reviendra plus loin sur ce résultat. Il convient encore de rappeler que la reconstitution observée en automne 1968 est probablement plus lente qu'en année « normale » comme l'indique la remontée de la nappe phréatique, en retard de 2 mois sur les années précédentes : on pourrait alors s'attendre à ce que le stock retrouve habituellement sa valeur hivernale dès la fin novembre.

* Ces 2 données étant naturellement exprimées en fonction de la terre fine.

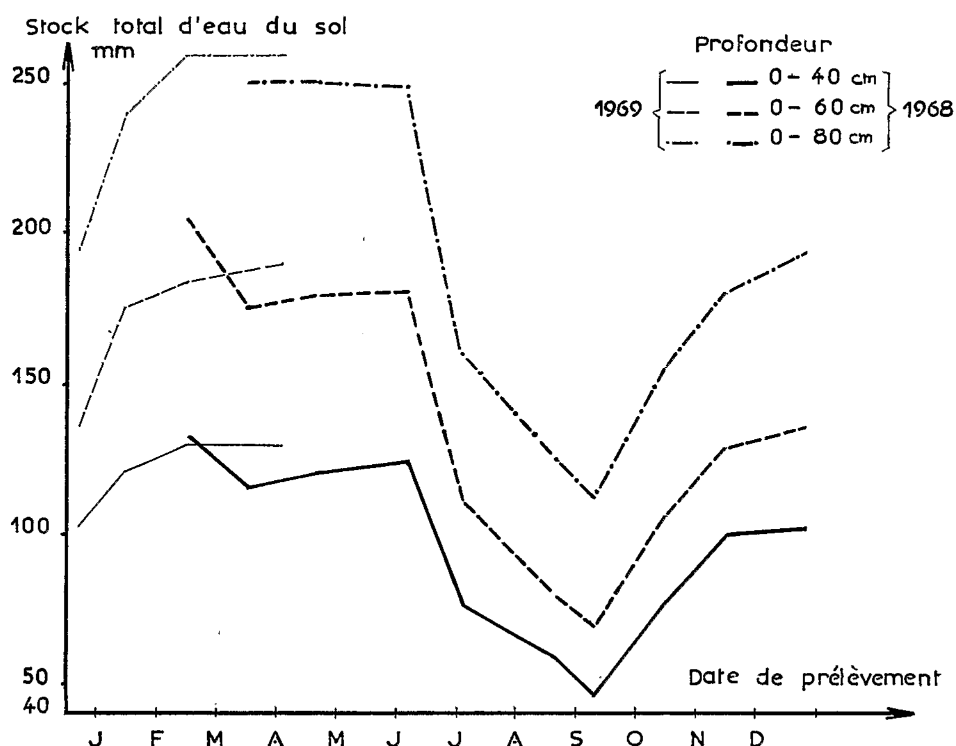


FIGURE 16. — Variation annuelle du stock total d'eau.

5) On peut encore remarquer que la différence entre les valeurs minimum et maximum du stock s'établit à 147 mm sur 80 cm d'épaisseur de sol, 121 mm sur 60 cm et 84 mm sur 40 cm. Il est permis de supposer que, pendant la période de végétation du printemps 1968, le déficit de précipitations (c'est-à-dire l'excédent de la consommation d'eau sur les apports extérieurs) dans la forêt de Sénart a dépassé 140 mm. Compte tenu du fait que les pluies ont atteint 110 mm pendant la même période, il semble que l'évapotranspiration correspondante s'est élevée à 250 mm pour une période de 3 mois, soit environ 3 mm par jour en moyenne. Ce chiffre est toutefois entaché d'une erreur par défaut, l'épaisseur de sol prise en compte dans ce calcul ne dépassant pas 80 cm.

On constate encore l'existance de 2 types de comportement du stock total d'eau, la différence se manifestant de part et d'autre du prélèvement de septembre qui correspond au stock minimum. Les points représentant les valeurs du stock en mm semblent se situer sur une portion d'ellipse dont le grand axe aurait pour pente approximative — 4/3 (fig. 17). De plus, si l'on calcule à partir des chiffres de porosité totale la valeur théorique du stock d'eau du sol en supposant celui-ci totalement saturé (nappe affleurante, ce qui ne se produit probablement jamais) on arrive à 420 mm environ. Tout se passe donc comme si le stock d'eau du sol évoluait de façon cyclique en liaison avec les mouvements de la nappe, les valeurs trouvées en période de recharge étant, à profondeur de nappe égale, sensiblement plus fortes qu'en période d'épuisement du stock. Cette évolution doit être interprétée en fonction de la demande en eau des végétaux, forte au printemps faible en automne.

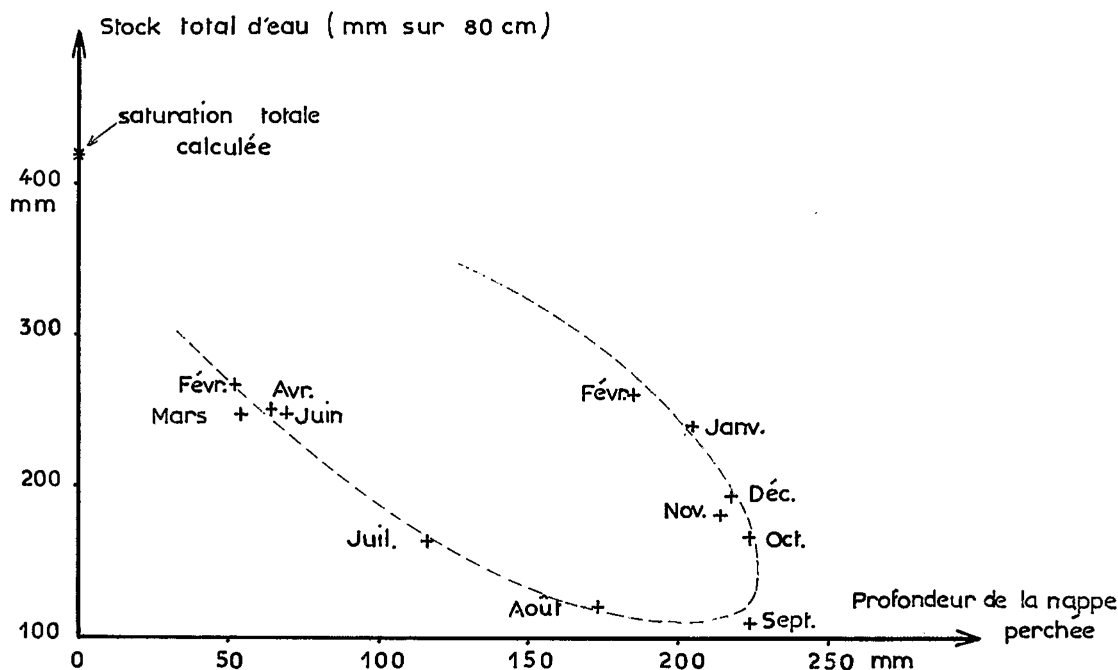


FIGURE 17. — Evolution du stock total d'eau au cours de l'année en fonction de la profondeur de la nappe.

7) On peut également signaler l'existence d'une corrélation très étroite entre la valeur du stock total d'eau du sol en mm et la teneur en eau % des horizons sub-superficiels (fig. 18). Le calcul effectué par exemple pour l'horizon 20-40 cm conduit à l'expression :

$$Y = 9{,}9\,X + 49 \qquad r = 0{,}986 \text{ pour } n = 12$$

avec Y = Stock d'eau en mm sur l'épaisseur 0-80 cm
X = Teneur en eau % dans l'horizon 20-40 cm.

Cette corrélation est très hautement significative. La seule connaissance du taux d'humidité dans l'horizon 20-40 cm permet donc d'estimer assez exactement la valeur du stock dans les 80 cm supérieurs du sol.

8) L'évolution saisonnière du profil hydrique peut être transformée en évolution du profil de pF, grâce aux courbes humidité-pF établies sur des échantillons prélevés à diverses profondeurs. Cette transformation a été efectuée sur l'ensemble des profils hydriques. Elle peut être résumée sous la forme du graphique 19 dans lequel on a représenté, pour 4 profondeurs (10-20, 30-40, 40-50, et 70-80 cm) l'évolution au cours de l'année du pF lors du prélèvement.

Ce graphique conduit aux conclusions suivantes : la tension d'humidité dans le sol étudié semble se situer en hiver au voisinage de pF 2,3. Elle subit une augmentation en été, selon des modalités qui diffèrent en fonction de la profondeur de l'horizon considéré : l'augmentation du pF est progressive et relativement faible entre 10 et 20 cm; elle débute en juillet et se termine brusquement fin octobre. Entre 30 et 40 cm, donc à la limite de l'horizon hydromorphe, l'augmentation de pF se manifeste un peu plus tôt, et elle est plus rapide, plus importante, et de plus longue durée que

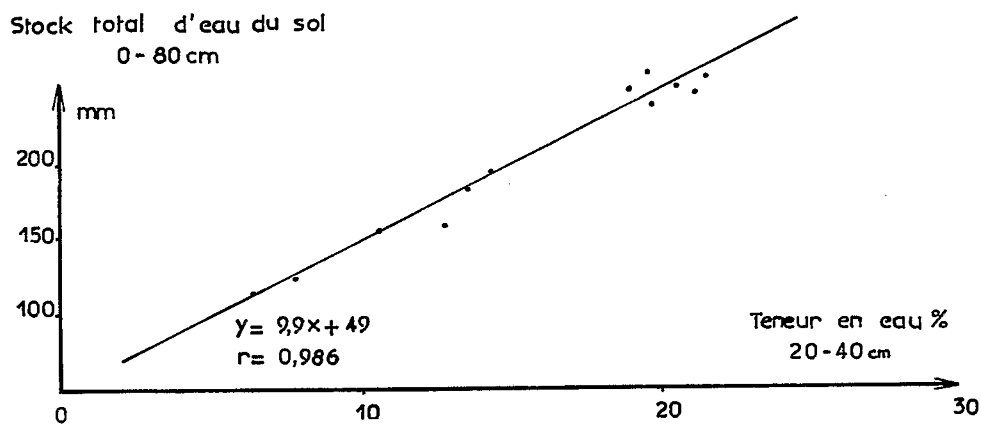


FIGURE 18. — Corrélation entre le stock total d'eau du sol et l'humidité de la couche 20-40 cm.

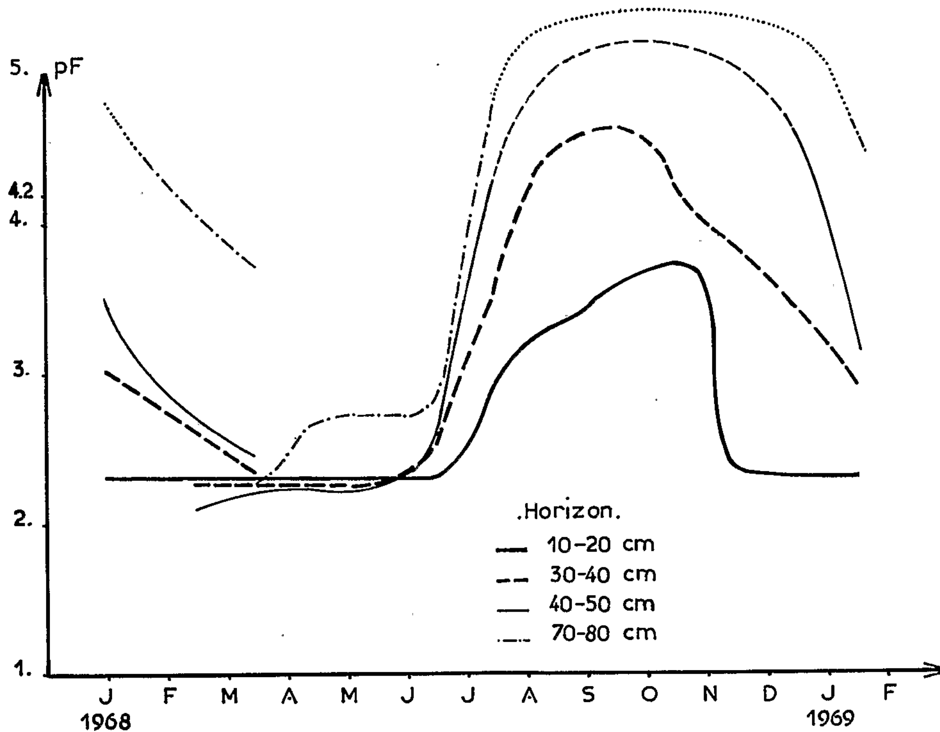


FIGURE 19. — Variations saisonnières du pF du sol lors du prélèvement.

dans l'horizon 10-20 cm. Le point de flétrissement est atteint pendant les mois d'août, septembre et octobre, et la diminution du pF en automne est progressive. Entre 40 et 50 cm, donc dans le haut du pseudogley, l'accroissement de pF est brutal et important en juillet : on passe d'emblée à une valeur de pF supérieure à 4,2 et le sol s'y maintient jusqu'à fin décembre. Enfin, à la base du pseudo-

gley l'évolution est identique, mais les valeurs de pF atteintes en été sont plus élevées, et la sécheresse persiste jusqu'à fin janvier 1969. En mars 1969, le pF n'est encore descendu qu'à 3,7.

En **conclusion**, le sol podzolique à pseudogley que nous avons étudié est caractérisé par le fait qu'en été, on observe dans le sol une sécheresse relative progressivement croissante en intensité et en durée au fur et à mesure que l'on passe de la surface du sol à la base de l'horizon de pseudogley. Même si l'on tient compte du caractère relativement sec de l'automne 1968 qui a accentué ce phénomène, on peut considérer que les sols à pseudogley sont caractérisés par une alternance de période d'engorgement et de sécheresse excessive (pF $>$ 4,2), dans l'horizon affecté par les fluctuations de la nappe.

VIII. — CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Les résultats des mesures des limites mécaniques des échantillons étudiés sont consignés dans le tableau IX ci-dessous, sous forme des teneurs en eau correspondant aux limites de liquidité et de plasticité et au point d'adhésivité.

TABLEAU IX
Limites d'Atterberg

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Profondeur (cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
Limite de liquidité		27,5	23,5	24,5	31,5	38,5	47,5	57,5	56,5	54,5	50,5	45,5	43,0
Point d'adhésivité		21,5	19,0	20,0	23,5	23,5	27,5	29,5	31,5	30,0	24,5	25,5	
Limite de plasticité					16,5	18,0	21,5	22,5	22,5	21,0	19,0	20,0	
Indice de plasticité*					15,0	20,5	26,0	35,0	34,0	33,5	31,5	25,5	

* Indice de plasticité = différence de teneur en eau entre les limites de liquidité et de plasticité.

Les déterminations n'ont pu être faites sur l'horizon A_1 riche en matière organique. De plus, la mesure de la limite de plasticité n'a pas été possible sur les échantillons 2, 3 et 4, sans doute par suite de la forte proportion de limons fins et grossiers.

Les résultats ci-dessus sont relatifs à des échantillons tamisés préalablement à 0,5 mm pour éliminer la fraction grossière. Ces résultats donnent lieu aux observations suivantes :

a) A l'exception de l'échantillon 2, encore organique, on note l'existence d'une corrélation assez étroite entre les limites mécaniques et la teneur en argile (fig 20). Toutefois, les droites de régression relatives aux échantillons 9 à 13, issus de l'argile sous-jacente, ne se confondent pas avec celles relatives aux horizons du matériau dérivé du loess. Ceci est très probablement dû à la

différence de nature de l'argile, l'état plastique puis l'état liquide étant atteints dans le niveau argileux pour des teneurs en eau légèrement inférieures à celles observées dans le matériau loessique.

b) La limite de liquidité augmente beaucoup plus rapidement avec le taux d'argile que les 2 autres limites. Par conséquent, l'indice de plasticité croît lui-même avec la teneur en argile de l'échantillon.

c) Le point d'adhésivité semble augmenter parallèlement à la limite de plasticité, la différence entre les 2 valeurs étant de l'ordre de 6 à 7 % en valeur absolue.

d) Il pouvait être intéressant de comparer les chiffres obtenus aux teneurs en eau effectivement observées sur le terrain. Mais pour cela, il est nécessaire d'effectuer au préalable la correction permettant de ramener les résultats à la terre fine (0-2 mm) à partir de la fraction 0-500 μ (Tabl. X).

On contate alors que les teneurs en eau observées situent pratiquement l'ensemble du profil au-dessus de la limite de plasticité pendant une grande partie de l'année (hiver et printemps). On note même que la limite de liquidité est atteinte entre 10 et 40 cm de profondeur pendant l'hiver, l'horizon affecté le plus nettement et le plus longtemps par le phénomène étant celui situé immédiatement sous l'horizon humifère, entre 10 et 20 cm de profondeur (humidité supérieure à la limite de liquidité de décembre à mai). Ce fait permet d'interpréter les difficultés de circulation hors des chemins en hiver.

En **conclusion**, la partie du profil située au-dessous de 40 cm se trouve pratiquement à l'état plastique pendant tout l'hiver et le printemps, alors que la limite de liquidité est atteinte en hiver et au début du printemps dans l'horizon situé sous l'horizon organique superficiel. On note également

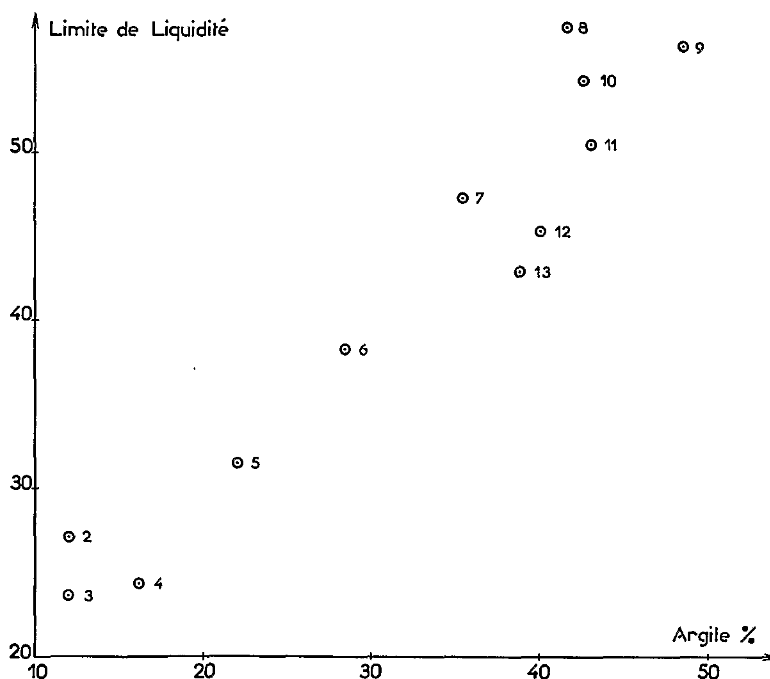


FIGURE 20. — Corrélation entre la limite de liquidité et la teneur en argile.

que l'horizon de pseudogley se trouve le plus souvent en hiver à une humidité correspondant au point d'adhésivité, ce qui laisse supposer que tout travail du sol dans cet horizon se heurterait alors à de très grandes difficultés et exigerait des moyens mécaniques puissants.

TABLEAU X

Limites d'Atterberg (ramenées à 100 de terre 0-2 mm)

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Profondeur (cm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130
Correction		0,865	0,865	0,875	0,885	0,875	0,890	0,880	0,925	0,925	0,955	0,960	0,975
Limite de liquidité		23,8	20,3	21,4	27,9	33,7	42,3	50,6	52,3	50,4	48,2	43,7	41,9
Point d'adhésivité		18,6	16,4	17,5	20,8	20,6	24,5	26,0	29,1	27,8	23,4	24,5	
Limite de plasticité					14,6	15,8	19,1	19,8	20,8	19,4	18,1	19,2	

IX. — ATMOSPHERE DU SOL *

L'atmosphère libre du sol (BACHELIER 1968 b) est intimement liée à la minéralisation du carbone et l'on considère qu'elle dépend essentiellement :

— des matières organiques minéralisables présentes dans le sol;

— de l'activité biologique et, à un degré moindre, de la respiration des racines et de la rhizosphère entourant ces racines. L'activité biologique du sol est elle-même fonction de la température, pour autant que la sécheresse ne s'en avère pas facteur limitant;

— des possibilités de diffusion des gaz, et donc de la porosité et de l'humidité du sol;

— enfin, de l'atmosphère à la surface du sol.

Les possibilités de fixation biologique et d'absorption par les racines du CO_2 des sols, ainsi que celles très particulières d'apport d'oxygène par les racines, ne sont pas à prendre en considération ici.

La description morphologique du profil et la répartition du carbone à travers celui-ci (fig. 6) montrent que, sous l'horizon humifère A_1, la matière organique, bien qu'à teneur très faible, demeure présente dans tout le profil : non seulement sous forme d'assez nombreuses racines jusqu'au sommet du pseudogley recouvert de meulières gréseuses disloquées, mais encore sous forme de substances humiques et glucidiques entraînées en profondeur chaque année par les pluies. Celles-ci dans la région parisienne sont très irrégulières et réparties sur toute l'année, mais l'entraînement en profondeur des substances organiques solubles ne peut se faire que quand les pluies s'additionnent dans un sol humide, et non quand elles rencontrent un sol sec, dont elles ne peuvent que mouiller l'horizon superficiel, ce dernier redevenant ensuite plus ou moins rapidement sec par évaporation.

* Cf. pour les techniques utilisées (mesure du CO_2 dégagé en surface, et mesure du CO_2 libre du sol à différentes profondeurs) BACHELIER (1968 a) et (1968 b).

La pénétration des pluies dans le sol, l'alimentation de la nappe perchée et l'entraînement des substances organiques facilement minéralisables ne peut se faire, d'après les différentes données déjà étudiées, qu'approximativement du mois de novembre à la fin mai, c'est-à-dire avec les pluies de la fin de l'automne, de l'hiver, et de la plus grande partie du printemps.

Les eaux des mares et des fossés qui se trouvent à proximité du lieu d'étude, avec la chute des feuilles, reçoivent des débris organiques riches en substances humiques, et sont toujours très brunes en ces saisons. On peut par ailleurs aussi observer à l'œil nu dans de nombreux profils voisins, mais sous végétation plus acide, la descente facile des substances humiques dans l'horizon A_2, ce qui correspond alors au passage à des sols de caractère podzolique plus accusé.

Ce sont les matières organiques facilement minéralisables et entraînées en profondeur qui, dans les périodes d'engorgement et de forte activité biologique créent les processus d'anaérobiose formateurs du pseudogley.

Cette activité biologique de minéralisation du carbone est étroitement liée à la température et, si nous comparons les variations saisonnières du dégagement de CO_2 en surface (fig. 22) aux variations de températures (fig. 21), nous pouvons constater un étroit parallélisme entre ces différentes courbes. La sécheresse peut cependant être facteur limitant de cette activité, ce qui explique les brusques diminutions du dégagement de CO_2 parfois observables en été, encore que les pF des horizons A ne s'élèvent que très temporairement au-dessus de 4,2 (cf. figure 19).

Si l'on compare maintenant les variations saisonnières du dégagement de CO_2 en surface (fig 22) aux variations saisonnières de la teneur en CO_2 libre du sol à différentes profondeurs (fig. 23), on s'aperçoit qu'il n'y a pas toute l'année parallélisme entre ces diverses variations et donc que la teneur en CO_2 dans l'atmosphère libre du sol ne suit pas entièrement l'activité biologique de ce dernier et son dégagement global de CO_2.

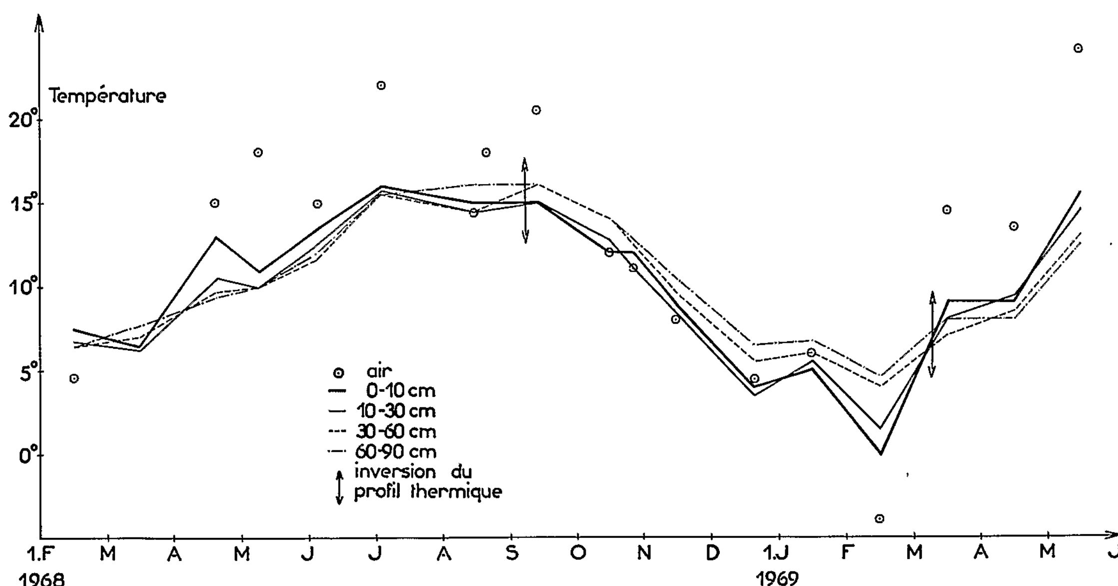


FIGURE 21. — Variations saisonnières de la température à différentes profondeurs.

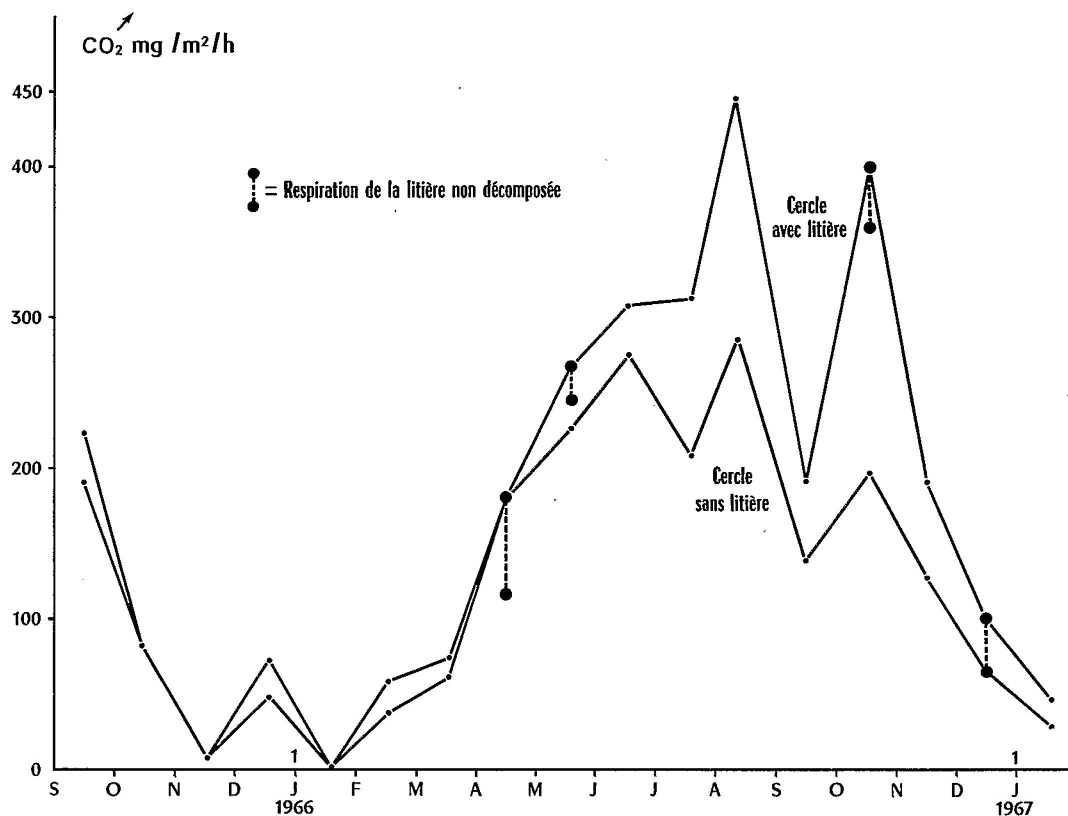


FIGURE 22. — Variations saisonnières du dégagement de CO_2 en surface.

A la remontée printanière de la température correspond une reprise de l'activité biologique générale, une augmentation du dégagement de CO_2 et une augmentation de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère libre du sol, et ceci jusqu'au début de juin. Mais, à partir du mois de mai, la nappe perchée commence déjà à être pompée par la végétation et l'évaporation croît; la nappe tend à baisser et le sol à progressivement se dessécher (cf. chapitre VII. Relations sol-eau). La stabilité structurale du sol s'améliore, la macroporosité du sol augmente et l'aération du sol devient possible; c'est pourquoi, à partir de juin, la teneur en CO_2 dans l'atmosphère libre du sol commence à régulièrement diminuer, alors que l'activité biologique de ce dernier et son dégagement global de CO_2 continuent de croître. Peut-être aussi les substances organiques facilement minéralisables commencent-elles à se raréfier dans le profil, l'essentiel du dégagement de CO_2 étant alors fourni par l'horizon A_1.

Au fur et à mesure de l'assèchement, et donc de la diminution d'épaisseur de la nappe perchée, les horizons drainés voient rapidement leur teneur en CO_2 libre diminuer, comme le montrent (fig. 23) les variations saisonnières du CO_2 libre dans les horizons 72, 102 et 132 cm. Sans nul doute qu'en dessous de 1 mètre le calcaire du sol contribue à fixer le gaz carbonique dissous et donc à en diminuer indirectement la teneur dans l'atmosphère du sol.

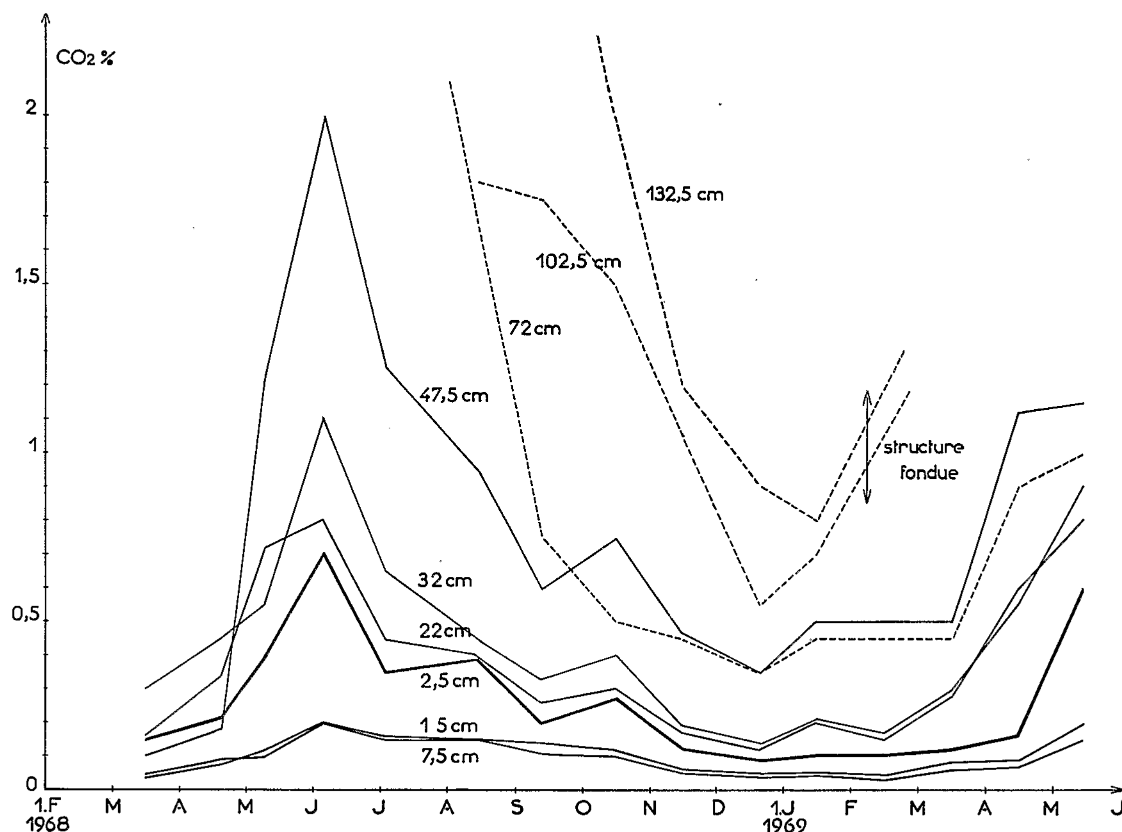


FIGURE 23. — Variations saisonnières de la teneur en CO_2 libre à différentes profondeurs.

Avec le retour de l'humidité, la structure du sol redevient fondue et le CO_2 ne peut plus diffuser. La nappe se reconstitue, mais la température hivernale freine alors l'activité biologique, aussi l'horizon de pseudogley 45-80 cm ne peut-il guère se développer ou tout au moins s'entretenir que pendant la période d'engorgement printanier correspondant aux mois de mai et de juin.

En dessous de l'horizon gravillonnaire situé à 80 cm, bien qu'en plus petit nombre, de nombreuses taches de réduction peuvent encore s'observer. Elles sont théoriquement fonctionnelles jusqu'en août, mais le manque de matières organiques minéralisables y limite certainement les fermentations et le développement des processus de réduction.

De l'atmosphère du sol dépendent le potentiel d'oxydo-réduction de ce sol et la nature de son peuplement végétal, comme précisément dans la forêt de Sénart a pu le montrer TURMEL en 1968.

X. — CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU SOL

A. — COMPLEXE ABSORBANT

Les déterminations de la capacité d'échange et des teneurs en bases échangeables ont été effectuées sur des échantillons prélevés à diverses profondeurs (tabl. XI et fig. 24 et 26).

TABLEAU XI
Bases échangeables, Capacité d'échange et Taux de saturation

Profondeurs	Bases échangeables (mé. pour 100 g)					Capacité d'échange T (mé. pour 100 g)	Taux de saturation V %
	Ca	Mg	K	Na	S		
0- 5 cm	3,0	0,6	0,4	0,1	4,1	26,0	16
5- 10 cm	1,1	0,3	0,2	0,1	1,7	11,0	15
10- 20 cm	0,1	0,3	0,1	0,1	0,6	7,0	9
20- 30 cm	0,4	0,2	0,1	0,1	0,8	5,5	14
30- 40 cm	0,6	0,1	0,1	0,1	0,9	6,9	13
40- 50 cm	0,2	0,5	0,2	0,1	1,0	9,5	10
50- 60 cm	0,9	1,6	0,3	0,2	3,0	13,5	22
60- 70 cm	4,3	2,2	0,3	0,4	7,2	18,0	40
70- 80 cm	9,1	3,8	0,3	0,8	14,0	23,0	61
80- 90 cm	13,3	6,6	0,3	1,4	21,6	25,5	85
90-100 cm	15,0	5,9	0,3	0,7	21,9	23,3	94
100-110 cm	17,1	5,8	0,3	0,8	24,0	22,5	100
110-120 cm	17,5	4,9	0,3	0,9	23,6	23,0	100
120-130 cm	21,3	4,9	0,3	1,0	27,5	21,3	100

Les conclusions que l'on peut tirer de ce tableau et des figures qui le résument sont les suivantes :

a) Les horizons supérieurs, y compris l'horizon superficiel 0-10 cm sont très pauvres en *bases échangeables :* la somme S de ces bases est en effet égale à 4 dans l'horizon A_1, inférieure à 2 mé % de 5 à 10 cm, et inférieure à 1 mé % de 10 à 50 cm de profondeur.

b) A partir de 50 cm, on note une augmentation importante, rapide et régulière des bases échangeables, dont la somme passe de 1 mé % vers 50 cm à 21 mé % à la base du pseudogley. A plus grande profondeur, l'augmentation se poursuit, mais beaucoup plus lentement. Le calcium représente une très forte proportion de ces bases, suivi par le magnésium. Le rapport Ca/Mg de l'ordre de 1 à 2 dans les horizons supérieurs, s'abaisse au dessous de l'unité dans la moitié supérieure du pseudogley, puis s'élève au voisinage de 2 dans la moitié inférieure de cet horizon, pour atteindre 3 vers 1 mètre de profondeur, où le sol devient calcaire.

c) La *capacité d'échange de cations T,* assez élevée en surface par suite de la teneur en matière organique (26 mé % de 0 à 5 cm et 11 mé % de 5 à 10 cm), s'abaisse rapidement pour passer par

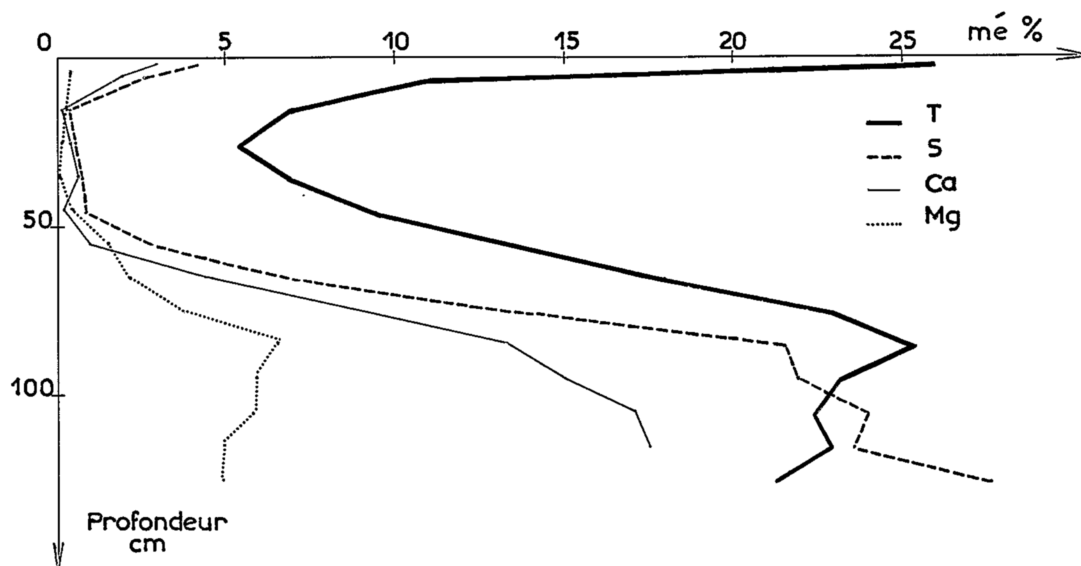


FIGURE 24. — Bases échangeables et capacité d'échange dans le profil.

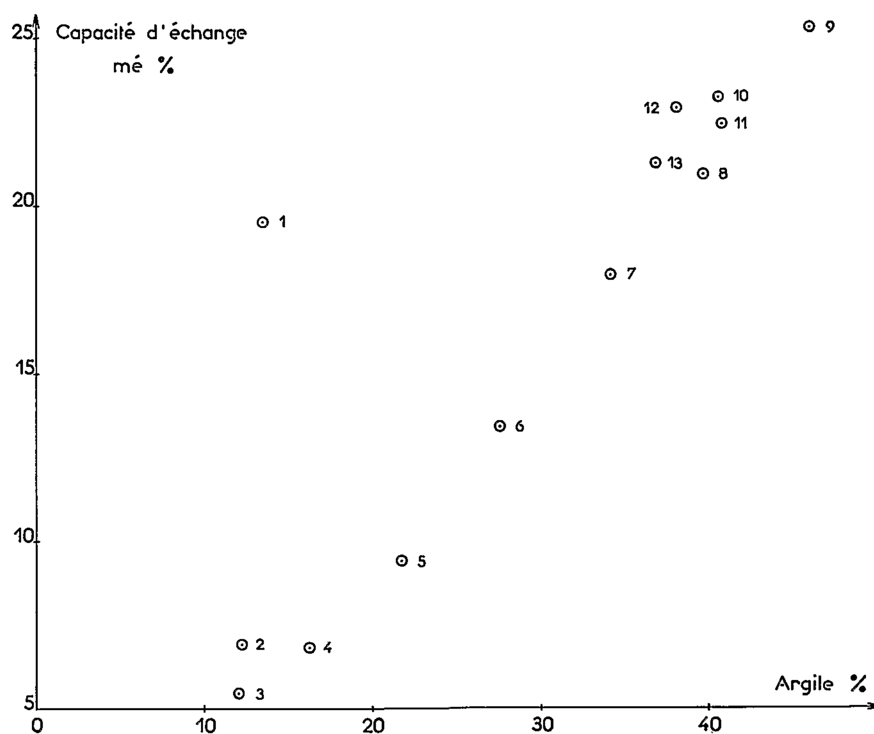


FIGURE 25. — Corrélation capacité d'échange - argile.

un minimum dans la couche 20-30 cm (5,5 mé %), puis elle croît ensuite régulièrement jusqu'à 90 cm de profondeur, pour diminuer très légèrement à plus grande profondeur.

Exception faite de l'horizon superficiel 0-10 cm, on observe l'existence d'une corrélation très étroite entre la capacité d'échange et la teneur en argile (fig. 25). Toutefois, pour les horizons situés au-dessous de 80 cm, la capacité d'échange est un peu supérieure, à taux d'argile égal, à celle des horizons moins profonds, probablement par suite de l'augmentation du taux de montmorillonite. Pour les horizons compris entre 10 et 90 cm de profondeur, et compte tenu de la correction due à la présence de matière organique, la relation liant la capacité d'échange au taux d'argile est la suivante :

$$T \text{ mé } \% = 0,66 \text{ A } \% - 5$$

On peut donc penser que la capacité d'échange de l'argile est de l'ordre de 60 mé pour 100 g. Cette valeur, assez élevée, traduit la présence de minéraux à forte capacité de fixation d'ions (montmorillonite) en association avec l'illite.

d) Le *taux de saturation S/T* se révèle très faible dans toute la partie supérieure du sol, horizon organique superficiel inclus : il est de 16 % en surface, de 15 % dans l'horizon 5-10 cm, de 6 % dans l'horizon 10-20 cm et ne dépasse pas 12 % jusqu'à 50 cm de profondeur. Il s'élève ensuite très régulièrement dans l'horizon de pseudogley pour arriver à la saturation vers 1 mètre de profondeur, là où apparaissent des traces de calcaires (fig. 26).

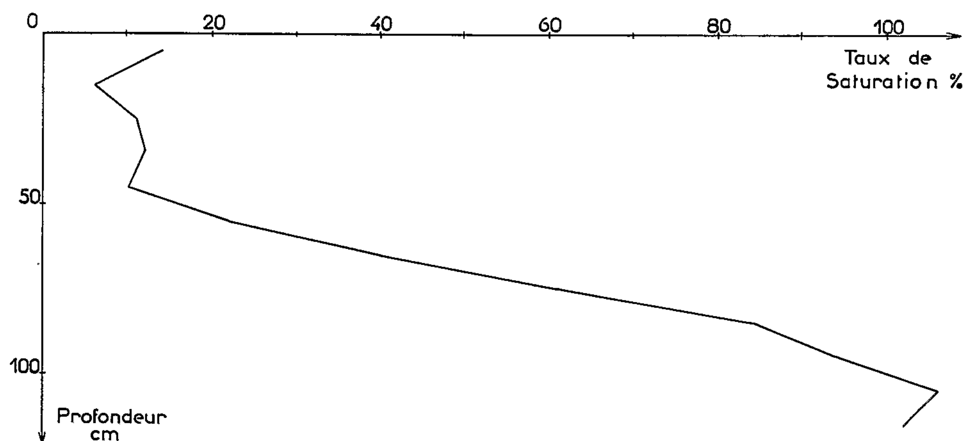


FIGURE 26. — Taux de saturation en bases échangeables.

Le sol étudié est donc caractérisé par une désaturation très forte des horizons supérieurs ,ce qui en justifie la classification proposée dans les sols podzoliques.

B. — pH

Les mesures de pH effectuées à diverses profondeurs ont donné les résultats présentés sur la figure 27. Ces résultats peuvent être résumés comme suit :

— L'acidité du sol est très forte en surface ($pH_{eau} = 3,8$ $pH_{KCl} = 3,1$).

— Elle diminue rapidement dans l'horizon sous jacent, pour atteindre respectivement 4,5 et 4,0 vers 40 cm de profondeur.

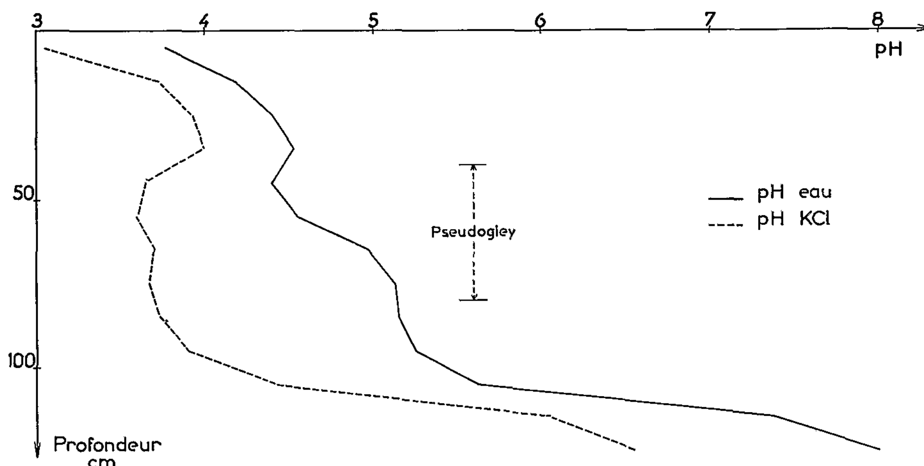


FIGURE 27. — Variation du pH dans le profil.

— Dans l'horizon de pseudogley, on observe une montée rapide du pH, qui atteint 5,2 (pH_{eau}) à la base de cet horizon. On observe par contre que le pH_{KCl} demeure stationnaire à 3,6 — 3,7.

— Une nouvelle augmentation du pH, très rapide, se manifeste à partir de 1 mètre de profondeur, avec des valeurs supérieures à 7,0 pour pH_{eau} et supérieures à 6,0 pour pH_{KCl} à partir de 120 cm, ce qui correspond à l'apparition de petits nodules calcaires.

— Il n'y a pas de relation rectilinéaire entre le pH et le taux de saturation, bien que ces 2 grandeurs varient dans le même sens.

Les différents horizons pédologiques ont donc des comportements assez nettement différents du point de vue acidité. D'autres remarques peuvent encore être faites :

a) La valeur $\Delta pH = pH_{eau} - pH_{KCl}$ (THIBAULT, 1968) présente elle aussi une évolution bien particulière : voisine de 0,5 dans l'horizon supérieur 10-40 cm, elle augmente rapidement et très régulièrement du haut vers le bas du pseudogley pour atteindre 1,4 unité pH à la base de cet horizon. Plus profondément, ΔpH semble se stabiliser à cette valeur élevée.

b) Le rapport $\Delta pH / pH_{eau}$ va donc prendre lui aussi des valeurs caractéristiques : de l'ordre de 10 % entre 10 et 40 cm, il passe de 11 à 28 % entre le sommet et la base du pseudogley, puis diminue ensuite régulièrement pour atteindre 18 % vers 130 cm et 12 % vers 160 cm (fig. 28).

On observe que la variation de $\Delta pH / pH_{eau}$ est en corrélation étroite, exception faite de l'horizon de surface, avec la teneur en éléments fins 0-20 μ. La corrélation est encore plus étroite avec le taux d'argile 0-2 μ, mais elle n'est alors valable qu'entre 10 et 80 cm, les horizons plus profonds semblant constituer une seconde population pour laquelle, à taux d'argile égal, le rapport $\Delta pH / pH_{eau}$ serait inférieur de 10 % environ. Ce fait peut être en rapport avec le changement de type de minéral argileux.

c) Les mesures de pH effectuées sur échantillons conservés humides semblent mettre en évidence une différence de comportement dans l'horizon surmontant le pseudogley : aussi bien pour le pH_{eau} que pour le pH_{KCl}, les chiffres obtenus sur échantillons humides sont plus faibles et sensiblements constants entre 10 et 50 cm ($pH_{eau} \simeq 4,1$ $pH_{KCl} \simeq 3,6$). Cette différence demeure toutefois assez faible.

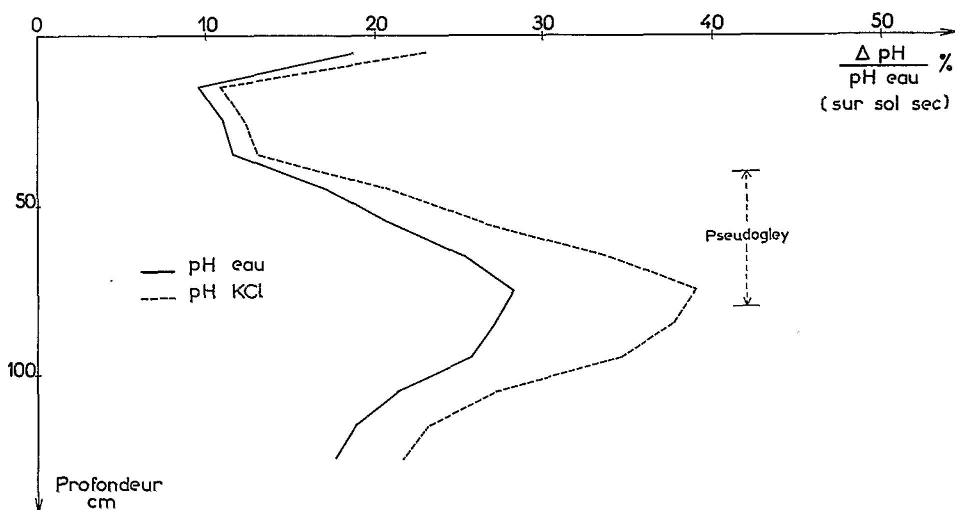


FIGURE 28. — Evolution du rapport : $\frac{\Delta \text{pH}}{\text{pH}_{\text{eau}}}$ dans le profil.

Il convient donc de retenir que le comportement de l'horizon de pseudogley est caractérisé surtout par une augmentation sensible du pH_{eau} par rapport aux horizons supérieurs, et corrélativement, par une valeur élevée du rapport Δ pH / pH_{eau} par rapport au reste du profil. L'interprétation, hypothétique, de ce dernier fait pourrait résider dans une dissociation des ions Al^{+++}, en quantité d'autant plus grande que l'on se rapproche de la base de l'horizon de pseudogley.

C. — FER LIBRE ET FER TOTAL

La figure 29 montre la répartition du fer total et du fer libre à travers le profil ainsi que l'évolution du pourcentage de fer libre par rapport au fer total.

Nous voyons que le fer total, aussi bien que le fer libre, ne dépassent pas respectivement 1,5 % et 1 % jusqu'à 40 cm, puis augmentent régulièrement jusqu'à 80-90 cm où ils représentent alors respectivement près de 5 % et 3 %, après quoi ils diminuent de nouveau jusqu'à 130-140 cm et augmentent ensuite pour retrouver à 160-170 cm les valeurs de l'horizon 80-90 cm. Après 180 cm, le fer total et le fer libre passent brutalement à 15 et 11,5 %.

Cette répartition du fer total et du fer libre dans le profil fait penser, là encore, à deux sols superposés, dont le sol supérieur 0-80 cm est actuellement fortement déferrifié en surface et dont le sol enterré a été secondairement enrichi superficiellement en fer et présente en profondeur une brutale accumulation de cet élément.

L'évolution du rapport fer libre sur fer total montre un maximum de mobilité du fer à la surface du pseudogley $g_{1\text{-}2}$ (40 ou 45-80 cm), puis une stabilité croissante de cet élément jusqu'à 1 mètre, avec toutefois un petit palier de mobilité dans l'horizon gravillonnaire 80-90 cm.

En dessous de 1 mètre, la mobilité du fer croît irrégulièrement jusqu'à 2 mètres, le rapport fer libre / fer total passant de 45 à 82 %.

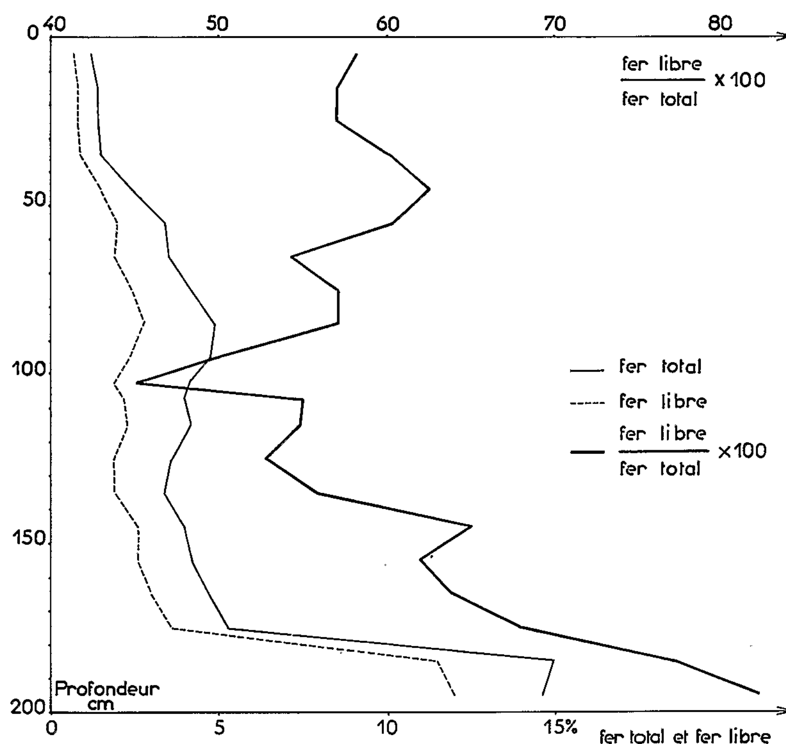


FIGURE 29. — Répartition du fer total et du fer libre dans le profil.

XI. — CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX

Nous avons suivi au cours de l'année les variations de certaines des caractéristiques chimiques (oxydation de l'eau, bases solubles, pH, silice, fer alumine) de trois eaux différentes, à savoir l'eau d'une mare située à proximitée de la station, l'eau présente dans une ancienne fosse pédologique et l'eau d'un piézomètre (ou, au début, l'eau des trous de sondage).

A. — OXYGÈNE DISSOUS ET OXYDABILITÉ DE L'EAU

Le niveau des mares est maximum au printemps. Il commence à diminuer à partir de la fin mai, il s'abaisse tout au long de l'été et il n'atteint parfois son minimum qu'en automne; la mare que nous avons suivie ne s'est ainsi trouvée à sec qu'en novembre et décembre 1968. Les mares se remplissent à nouveau en hiver.

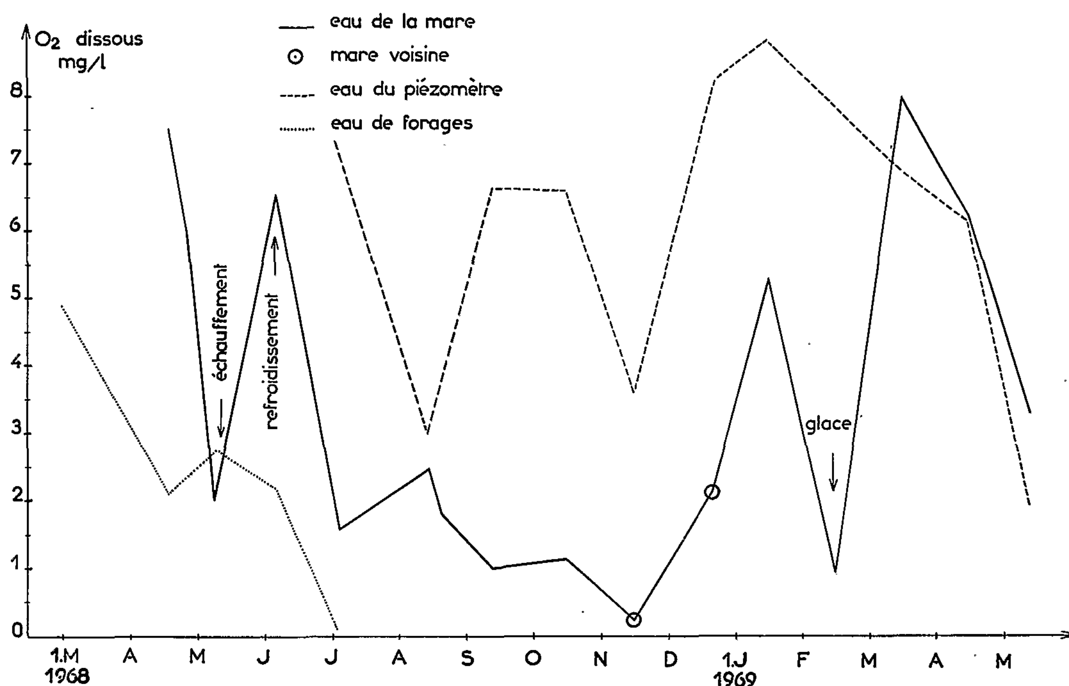


FIGURE 30. — Variations saisonnières de l'oxygène dissous dans l'eau de la mare et de la nappe.

La teneur en oxygène dissous de l'eau de la mare (fig. 30) diminue progressivement au printemps avec l'élévation de la température et l'abaissement du niveau de l'eau; non seulement parce que la solubilité des gaz est inversement proportionnelle à la température, mais aussi parce que l'activité biologique croît avec la température. Toute modification brutale de la température au printemps peut fortement modifier la teneur en oxygène de l'eau. Nous voyons ainsi (fig. 30) le 9 mars une brusque diminution de la teneur en oxygène dissous consécutive au léger réchauffement des jours précédents et le 15 juin, inversement, une brutale remontée de cette teneur en oxygène dissous faisant suite à une courte période de refroidissement.

Avec la remontée des eaux et le retour du froid, la teneur en oxygène dissous dans l'eau de la mare remonte rapidement mais peut présenter en hiver une chute brutale si la surface de la mare vient à être recouverte par de la glace, comme cela s'est produit le 15 février 1969.

L'oxydation de l'eau dans le sol est au printemps inférieure à celle de l'eau de la mare, car dans le sol, l'eau se situe à cette époque dans le pseudogley dont la structure est alors fondue et où les matières organiques solubles se minéralisent en créant un milieu asphyxiant.

Par contre, l'eau des piézomètres apparaît, à la fin de l'été et en automne, nettement plus oxydée que dans les mares, car, d'une part, à cette époque les matières organiques solubles entraînées dans la nappe à la fin de l'hiver et au printemps se sont toutes déjà minéralisées en mai et en juin dans le pseudogley 45-80 cm (ou éventuellement en juillet en dessous de 80 cm) et, d'autre part, le calcaire du sol contribue en dessous d'un mètre à fixer le CO_2 dissous. En septembre, l'eau se trouve à plus de 2 mètres dans le piézomètre et renferme ainsi 6,5 mg/litre d'oxygène dissous contre 1 mg/litre dans l'eau de la mare.

La mesure de l'oxydabilité des eaux, c'est-à-dire la mesure de leur pouvoir réducteur par un oxydant (en l'occurence le permanganate de potassium en milieu acide), vérifie indirectement les mesures de l'oxygène dissous. Nous voyons, en effet, en comparant les résultats de la figure 31 avec ceux de la figure 30 que les diverses eaux sont d'autant moins oxydées que leur pouvoir réducteur est plus élevé.

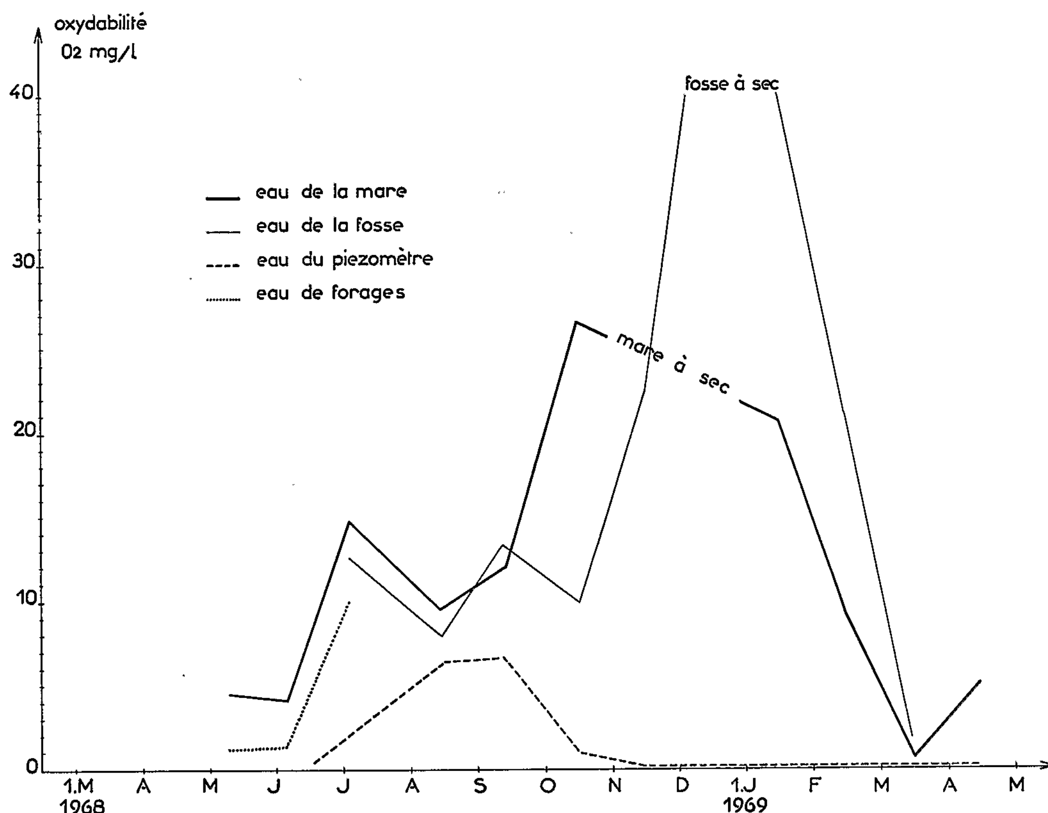


FIGURE 31. — Variations saisonnières de l'oxydabilité de l'eau de la mare et de la nappe.

B. — BASES SOLUBLES ET pH

1) Calcium, Magnésium et Sodium.

Les figures 32, 33 et 34 résument les variations saisonnières de ces éléments dans l'eau de la mare et l'eau de la nappe.

L'eau des mares demeure toute l'année pauvre en ces trois éléments.

Par contre, dans le sol, l'eau de la nappe perchée s'enrichit en ces éléments en descendant en-dessous de l'horizon gravillonnaire de juin à octobre, et l'on a inversement une très brutale

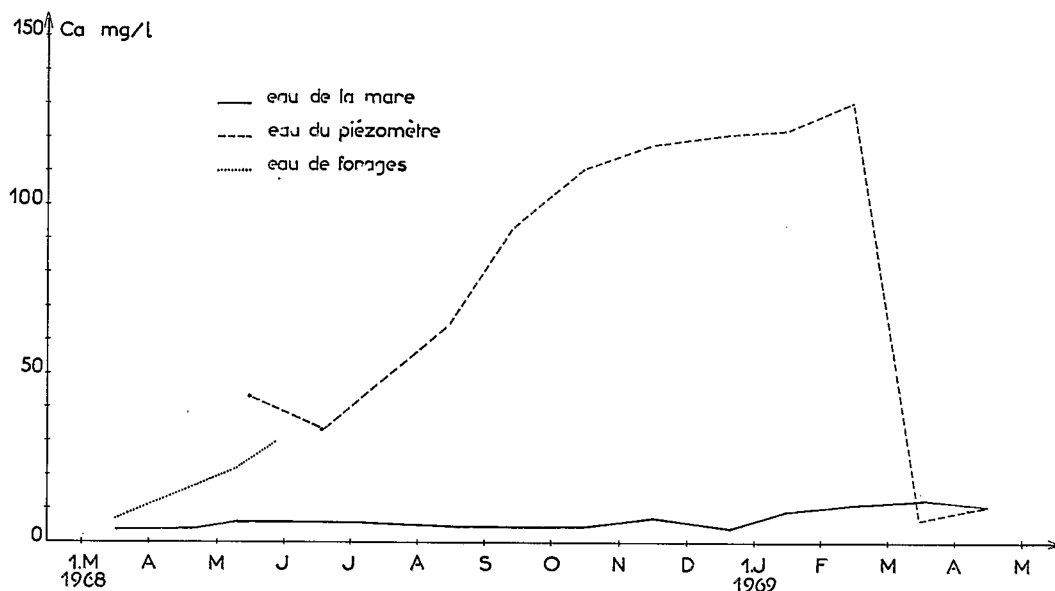


FIGURE 32. — Variations saisonnières du calcium dans l'eau de la mare et de la nappe.

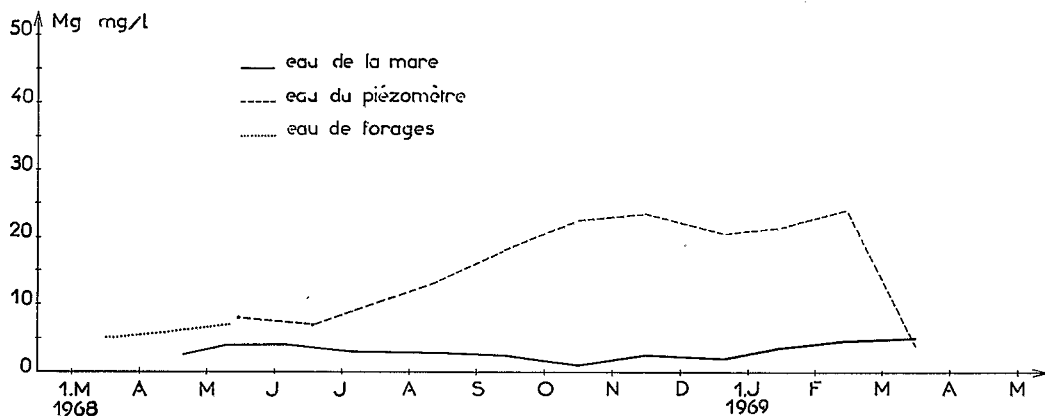


FIGURE 33. — Variations saisonnières du magnésium dans l'eau de la mare et de la nappe.

diminution de ces éléments dès que la nappe repasse au-dessus de l'horizon gravillonnaire et pénètre dans le pseudogley plus acide, à pH inférieur à 5,2; cette reconstitution de la nappe dans le pseudogley s'est effectuée pour l'année 1969 en février.

Le calcium qui, dans l'eau du piézomètre, a atteint 120 mg/litre le 15 février est retombé brusquement à 7 mg/litre le 15 mars et a rejoint ainsi les teneurs quasi permanentes des eaux de la mare au cours de l'année.

Le magnésium qui s'est maintenu entre 20 et 25 mg/litre du 15 octobre au 15 février est brusquement tombé à 5 mg/litre le 15 mars, valeur constante des mares en cet élément.

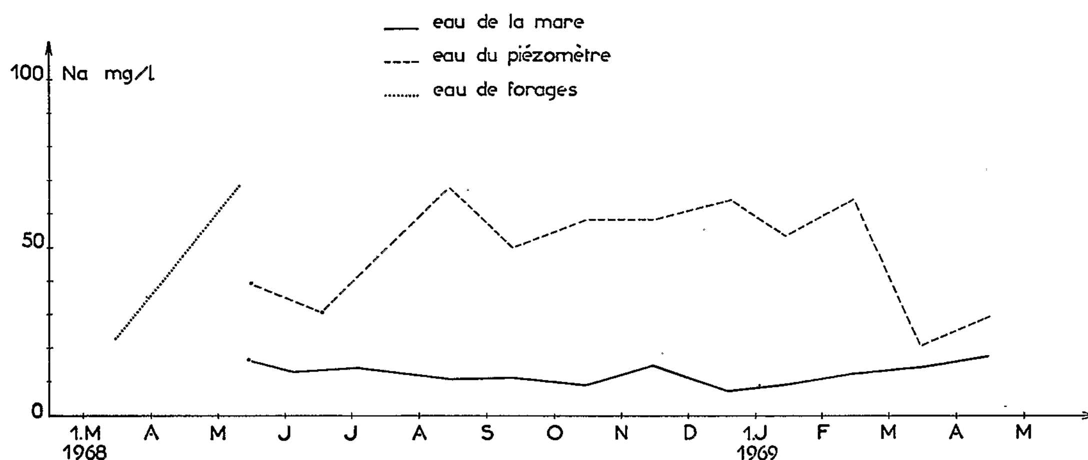


FIGURE 34. — Variations saisonnières du sodium dans l'eau de la mare et de la nappe.

Le sodium qui a varié entre 50 à 70 mg/litre du 15 août au 15 février est de même tombé brusquement à 20 mg/litre le 15 mars, mais semble demeurer, même à cette valeur, légèrement supérieur aux valeurs offertes par les mares au cours de l'année.

2) **Potassium** (fig. 35).

Pour le potassium, qui est essentiellement en rapport avec les matières organiques, les eaux de la mare sont plus riches en cet élément que les eaux des piézomètres et présentent un maximum en automne et en hiver, lié à l'apport des feuilles mortes et à leur macération dans l'eau.

Une analogie peut d'ailleurs à ce sujet être notée avec les variations saisonnières de l'oxydabilité de l'eau (fig. 31).

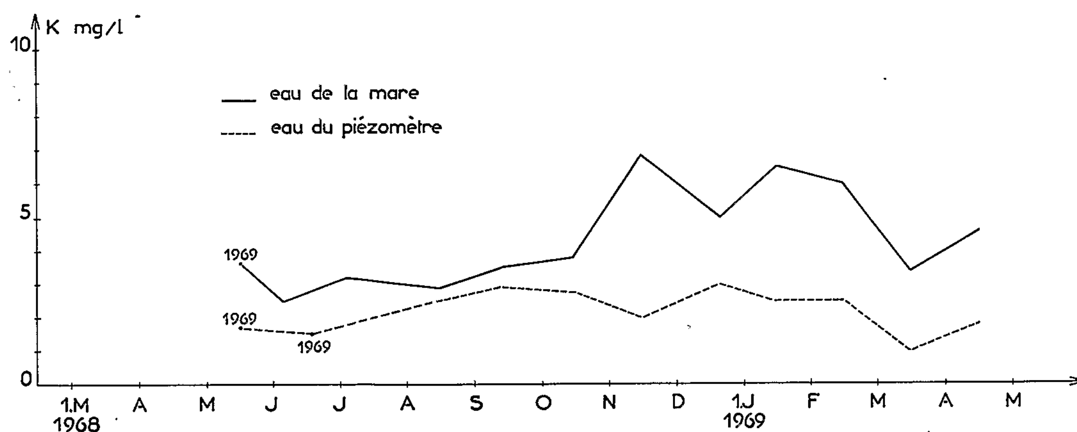


FIGURE 35. — Variations saisonnières du potassium dans l'eau de la mare et de la nappe.

3) **pH** (fig. 36).

Alors que le pH de l'eau des mares demeure pratiquement constant toute l'année, variant seulement de 4,5 à 4,8 (et le plus souvent même de 4,6 à 4,7), le pH de la nappe perchée suit le pH de l'horizon pédologique dans lequel la nappe se situe. Ce qui fait que, comme l'eau des mares, l'eau de la nappe est à pH 4,6-4,7 en mars, avril et mai, c'est-à-dire dans le pseudogley 40-80 cm. Elle atteint pH 5,5 début juillet en descendant en-dessous de l'horizon gravillonnaire (80 cm) puis pH 5,8 et même pH 6 en-dessous de 120 cm dans les horizons calcaires.

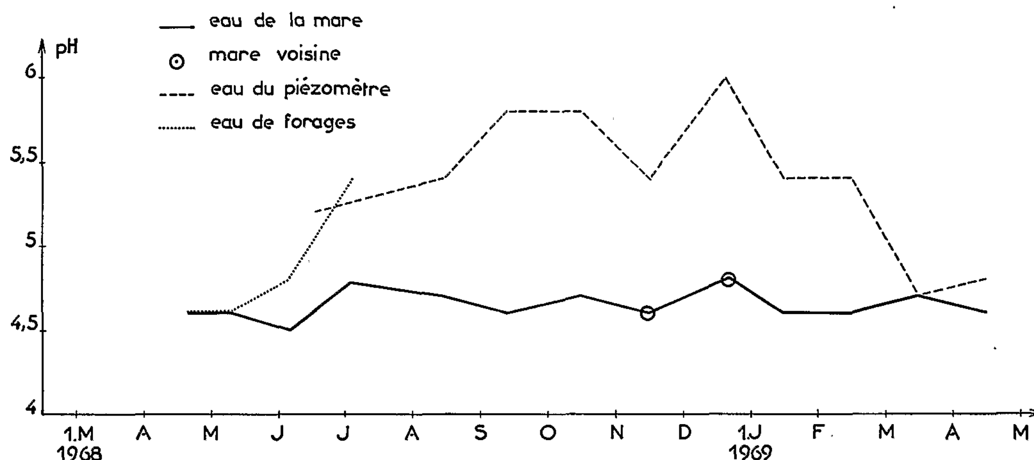


FIGURE 36. — Variations saisonnières du pH de l'eau de la mare et de la nappe.

C. — SILICE, FER ET ALUMINE

Les quelques mesures que nous avons pu faire au cours de l'année font apparaître des périodes de plus ou moins grande solubilité de la silice, du fer et de l'alumine et soulignent l'intérêt qu'il y a dans les sols hydromorphes à suivre au cours de l'année la composition chimique des eaux.

1) **Silice.**

On observe (fig. 37) aussi bien dans l'eau des mares que dans l'eau de la fosse pédologique et, à un degré moindre, dans l'eau du sol, une baisse brutale de la teneur en silice soluble de mai à juillet, c'est-à-dire seulement en début de baisse des eaux, puisqu'en effet, dès août, les teneurs en silice soluble tendent à remonter bien que les eaux continuent à baisser. La mare étudiée ne sera ainsi à sec qu'en novembre et décembre.

On peut penser que l'on a :

a) une solubilisation de la silice par les substances organiques de type fulvique qui sont issues des feuilles mortes et des débris végétaux de l'automne et qui se conservent intactes tout l'hiver avec la silice qu'elles ont « complexée ».

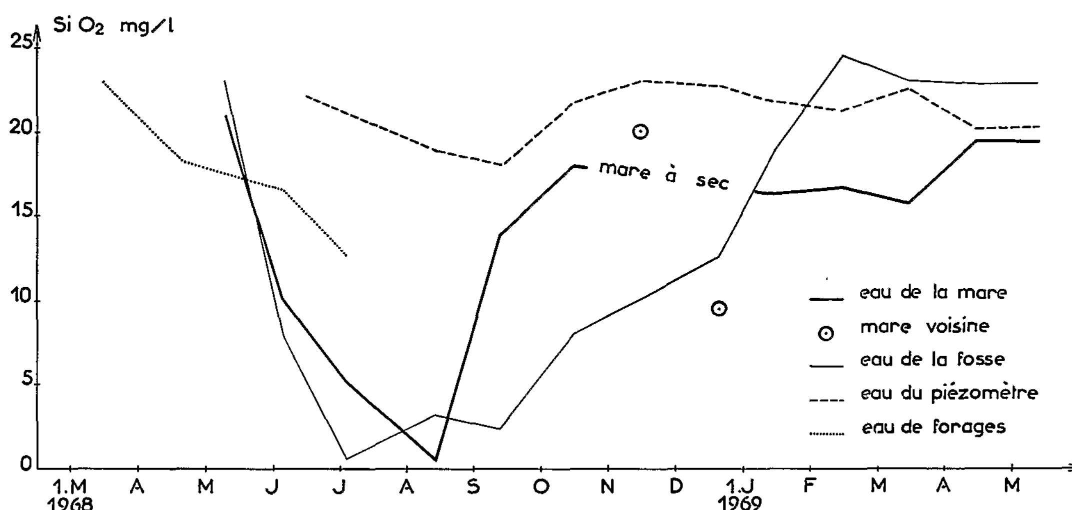


FIGURE 37. — Variations saisonnières de la silice dans l'eau de la mare, du piézomètre et de la fosse.

b) une dégradation biologique de ces substances à partir du mois de mai et jusqu'au cœur de l'été conjointement à l'élévation de la température, ce qui entraîne une diminution consécutive des teneurs en silice dans les eaux.

c) une solubilisation plus forte de la silice dans l'eau du piézomètre avec la descente de la nappe dans les horizons calcaires à pH rapidement alcalin, puisque passant de pH 5,25 à 90-100 cm à pH 7,4 à 110-120 cm et pH 8 à 120-130 cm.

Les meulières gréseuses en dalles horizontales que l'on rencontre dans le profil vers 30 cm et qui, plus ou moins proches de la surface*, sont communes à toute cette partie de la forêt, apparaissent formées en place, étant donné le dallage régulier qu'elles forment et qui n'est que localement perturbé par le jeu des racines.

Elles sont actuellement en voie d'altération; leur formation est ancienne et doit correspondre à une période chaude et semi-désertique offrant des nappes d'eau temporaires (CAILLEUX A., 1967). Il ne semble pas qu'elles puissent résulter d'un intense dépôt siliceux au sein d'un ancien sol podzolique ni, à plus forte raison, être en relation avec les migrations de la silice dans le sol actuel.

2) **Fer et Alumine.**

Le fer et l'aluminium demeurent pratiquement constants toute l'année dans l'eau de la mare et dans l'eau des piézomètres, alors que ces éléments montrent de très fortes variations de solubilité dans l'eau des fosses pédologiques (fig. 38 et 39).

Les mares forment en effet des cuvettes isolées par un fond argileux imperméable et par suite leurs eaux s'avèrent directement indépendantes de la nature des sols sous-jacents. D'autre part, l'eau

* Situées à 20 cm de profondeur vers le rond-point de la forêt le plus proche, ces meulières gréseuses sont aussi facilement visibles à la fin de l'été dans le fond des mares peu profondes qui sont à sec.

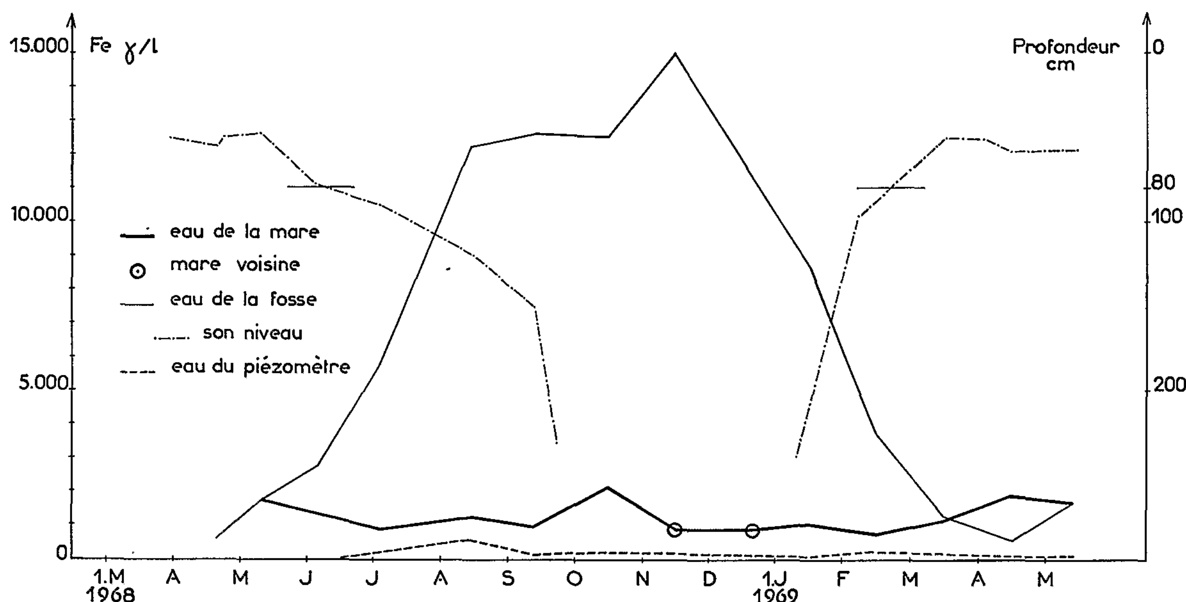


FIGURE 38. — Variations saisonnières du fer dans l'eau de la mare, du piézomètre et de la fosse pédologique.

des piézomètres, privée de l'apport organique des feuilles mortes et des débris végétaux, ne renferme qu'une quantité limitée de substances organiques facilement minéralisables qui ne peut guère, comme nous l'avons vu, que réduire très partiellement le fer de l'horizon de pseudogley 45-80 cm.

Par contre, dans les fosses pédologiques où les débris végétaux pourrissent au contact même des divers horizons du profil, les fermentations d'été liées à la température et les fermentations d'automne liées à l'apport de débris végétaux encore frais produisent d'intenses phénomènes de réduction (odeur d'H_2S, gleyification) et solubilisent fortement le fer.

Pour l'aluminium, la courbe dans l'eau de la fosse pédologique s'avère différente de celle du fer. On a en effet une brutale solubilisation de cet élément en août suivi d'une diminution d'abord rapide en septembre, puis plus lente de septembre à avril. Ne connaissant pas la répartition de l'aluminium dans ce profil, il nous est impossible d'interpréter ces variations; tout au plus peut-on imaginer, étant donné qu'il s'agit d'un sol podzolique avec une accumulation de fer vers 80 cm, qu'il existe aussi dans ce profil une accumulation de boehmite à cette même profondeur (DUCHAUFOUR, 1960) et que cette dernière aurait été partiellement solubilisée par les eaux riches en débris organiques en décomposition, eaux qui dans la fosse se trouvaient encore à ce niveau au mois d'août. Ceci reste une hypothèse à vérifier.

On peut aussi observer (fig. 37 et 39) une évolution inverse de la solubilité de la silice et de l'aluminium, ce qui a déjà été signalé par SCHACHTSCHABEL et HEINEMANN (1967) dans l'eau de sols sur limon.

En **conclusion,** et sans revenir sur leur interprétation, les caractéristiques des eaux des mares, des fosses pédologiques et des piézomètres ou des trous de sonde sont toutes différentes.

L'eau de la mare est faiblement oxydée en été et en automne, présentant une forte oxydabilité à la chute des feuilles. Ses teneurs en calcium, magnésium et sodium sont faibles et ne varient pratiquement pas au cours de l'année. Ses teneurs en potassium sont par contre plus élevées en automne

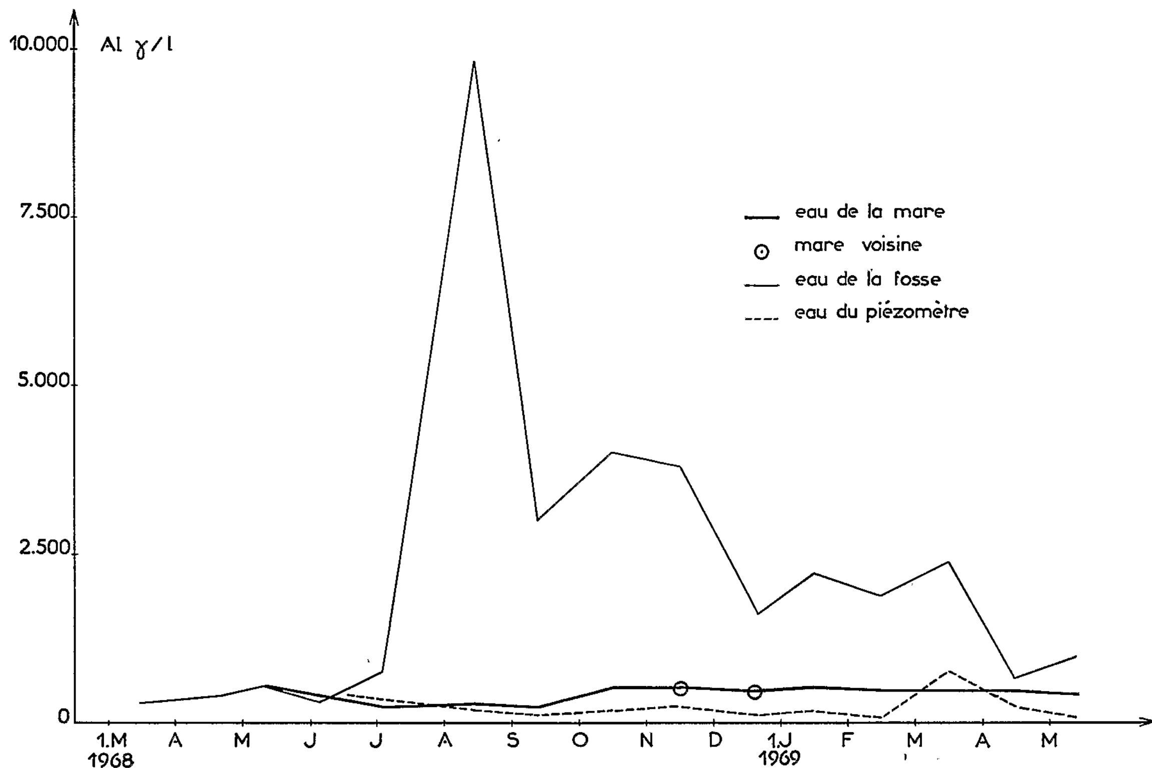


FIGURE 39. — Variations saisonnières de l'aluminium dans l'eau de la mare, du piézomètre et la fosse pédologique.

et en hiver. Son pH se situe autour de 4,6-4,7. Ses teneurs en fer et en alumine sont faibles et approximativement constantes toute l'année. Ses teneurs relativement élevées en silice (15 à 20 mg/l de SiO_2) s'effondrent en été.

L'eau des fosses, tant pour son aération que pour son oxydabilité, se rapproche de l'eau de la mare, mais étant en contact direct avec les divers horizons du sol, et non plus, comme l'eau de la mare, stagnante au-dessus de ce dernier, elle voit ses caractéristiques chimiques varier au cours de l'année en fonction à la fois de son caractère plus ou moins réducteur et des horizons au contact desquels elle se trouve. Elle se rapproche de l'eau des piézomètres pour les bases échangeables et de l'eau de la mare pour le silice, mais elle est spécifiquement très ferrugineuse en été et en automne (10 000 à 15 000 gamma Fe/litre) et présente un maximum d'aluminium en août (10 000 gamma Al/litre) qui s'abaisse d'abord rapidement et ensuite plus lentement pour atteindre seulement 500 gamma/litre en avril.

L'eau de la nappe perchée, prélevée pour sa partie supérieure dans les piézomètres ou les trous de sonde, présente un minimum d'aération dans le pseudogley 45-80 cm en mai-juin et vers 110-120 cm en juillet, mais faute de matières organiques fermentescibles (disparition de l'oxydabilité), cette eau retrouve ensuite plus en profondeur 6,5 à 8 mg/litre d'oxygène dissous. En descendant en-dessous du pseudogley, l'eau du sol s'enrichit en calcium, magnésium et sodium, qui disparaissent

brutalement dès que le niveau d'eau repasse au-dessus de 80 cm. Ses teneurs en potassium sont inférieures à celles de l'eau de la mare et dépendent plus de la constitution minérale du sol que des matières organiques. Son pH suit celui des horizons qu'elle imprègne. Ses teneurs en fer et en alumine tout au long du profil demeurent très faibles. Ses teneurs en silice sont par contre plus élevées que celles de l'eau de la mare, mais présentent le même minimum, fin juin début juillet, vers 110-120 cm de profondeur.

XII. — CONCLUSIONS

En conclusion de ces observations, il semble que l'on puisse résumer les caractéristiques du sol étudié de la façon suivante.

Le sol de la forêt de Sénart est un sol podzolique à pseudogley, formé sur un matériau constitué par un limon remanié et enrichi en éléments grossiers, qui repose lui-même à 80 cm de profondeur sur un matériau argilo-sableux à argileux dans lequel on peut localiser de nombreux vestiges d'un paléosol. Le sol supérieur (0-80 cm) est le siège d'une hydromorphie temporaire consécutive à la présence d'une nappe perchée, dont le niveau maximum d'hiver se situe à 40-45 cm de profondeur et qui détermine les processus saisonniers de fermentation anaérobies entraînant la formation d'un horizon de pseudogley entre 40 et 80 cm.

On note dans l'ensemble du profil une variation sensible du taux d'argile qui paraît s'expliquer par un certain lessivage, mais aussi par la formation d'argile au détriment de la fraction limoneuse dans l'horizon de pseudogley.

Ce sol est très acide et fortement désaturé en surface mais ces caractères s'atténuent rapidement en profondeur, le sol devenant calcaire à partir de 100 cm.

Il a été possible de définir les variations de la réserve en eau au cours d'un cycle annuel complet, et de montrer qu'il existait en fait deux « états hydriques » assez nettement distincts : l'un en hiver et au printemps, l'autre en été et en automne. Entre les stocks d'eau minimum et maximum de ces deux états, il existe sur 80 cm une différence chiffrée à environ 150 mm.

Avec la remontée printanière de la température, et pour autant que l'humidité du sol ne soit pas facteur limitant, augmentent l'activité biologique du sol et la minéralisation des substances organiques; le dégagement de CO_2 s'accroît ainsi que la teneur en ce gaz dans l'atmosphère du sol. Mais, à partir du mois de mai, avec la réduction de la nappe perchée, la stabilité structurale du sol devient meilleure, sa porosité augmente, son aération devient possible, les substances organiques solubles et facilement minéralisables tendent à se raréfier et la teneur en CO_2 dans l'atmosphère du sol commence à diminuer, alors que le dégagement global de CO_2 issu principalement de l'horizon humifère continue à croître. En-dessous d'un mètre, le calcaire aide à la fixation du CO_2. Avec le retour de l'humidité, la structure du sol redevient fondue et s'oppose à la diffusion du CO_2, mais la température hivernale freine alors l'activité biologique du sol.

En ce qui concerne plus particulièrement l'horizon de pseudogley 34-80 cm, qui nous paraît déterminer les grandes lignes du comportement de ce sol sur le plan de l'utilisation, on peut en relever les caractères suivants :

Le sommet de cet horizon correspond au plus haut niveau de la nappe, encore que sa partie supérieure ait dû dans le passé être le siège de phénomènes d'engorgements plus prononcés.

On y observe avec la profondeur un enrichissement progressif en argile et une diminution des limons. Sa densité apparente varie de 1,30 à 1,40. Sa porosité totale se situe aux alentours de 48 à 50 % (contre 58 % dans les 10 premiers centimètres du profil et 57 dans les 10 suivants); sa microporosité est très faible. Son indice d'instabilité (I_s) demeure constant de haut en bas et voisin de 2,0 avec une valeur élevée des agrégats stables à l'eau.

Son gradient d'humidité est élevé, augmentant avec la profondeur. On a en juillet un dessèchement très rapide de ce pseudogley avec passage brutal à un pF supérieur à 4,2. De juillet 1968 à décembre 1968-janvier 1969, ce pseudogley a été marqué par la sécheresse. Pendant 3 à 5 mois par an, en hiver et au printemps, il possède un état plastique et se trouve au voisinage de l'adhésivité. Mais, l'étude de l'activité biologique de ce sol montre que les processus de fermentation, susceptibles de développer ou seulement d'entretenir son horizon de pseudogley, n'existent qu'en mai et début juin, soit 1 mois 1/2 par an.

Chimiquement, il existe dans cet horizon de pseudogley, avec la profondeur, une forte montée des bases échangeables (S), de la capacité d'échange (T) et aussi du taux de saturation (V ou S/T). La mobilité du fer y diminue avec la profondeur mais augmente ensuite régulièrement et fortement dans le paléosol. Le pH_{KCl} y demeure stationnaire (3,6-3,7), alors que le pH_{eau} y augmente passant de 4,5 à 40 cm à 5,2 à 80 cm. Le rapport $\frac{pH_{eau} - pH_{KCl}}{pH_{eau}}$ y croît aussi très nettement.

Concernant enfin les eaux du biotope, l'eau des mares apparaît fondamentalement différente de celle des sols.

Les mares forment des cuvettes à fond pratiquement imperméable dont les eaux sont faiblement oxydées en été et en automne, et deviennent très organiques à la chute des feuilles. Ces eaux sont chimiquement pauvres en calcium, magnésium et sodium, mais plus riches en potassium qui est lié aux débris organiques en décomposition. Leur pH se situe autour de 4,6-4,7. Elles sont pauvres en fer et en alumine; leurs teneurs relativement élevées en silice s'effondrent en été.

L'eau des fosses récemment creusées dépend de l'ensemble des horizons pédologiques avec lesquels elle est en contact.

L'eau du sol présente un minimum d'aération dans le pseudogley 45-80 cm en mai-juin et vers 110-120 cm en juillet, mais retrouve plus en profondeur 6,5 à 8 mg/l d'oxygène dissous. En descendant en-dessous du pseudogley, l'eau du sol s'enrichit en calcium, magnésium et sodium, qui disparaissent brutalement, dès que le niveau d'eau repasse au-dessus de 80 cm. Ses teneurs en fer et en alumine demeurent toujours très faibles, mais ses teneurs en silice sont plus élevées que celles de la mare et présentent le même minimum, fin juin début juillet, vers 110-120 cm de profondeur.

RESUME

Cette étude d'un certain nombre de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques d'un sol podzolique à pseudogley sur limons remaniés a montré entre autres que l'horizon de pseudogley (40-80 cm) correspondait à l'existence d'une nappe perchée présente dans cet horizon 3 à 5 mois par an : de janvier ou mars, selon les années, à la mi-juin. Mais, en fait, l'étude de l'activité

biologique de ce sol fait ressortir que les processus de fermentation, qui développent ou seulement entretiennent cet horizon de pseudogley, ne peuvent guère se manifester qu'en mai et début juin, soit seulement 1 mois 1/2 par an.

La variation des teneurs en argile dans l'horizon de pseudogley s'explique à la fois par le lessivage du sol et une formation d'argile au détriment de la fraction limoneuse.

L'eau des mares voisines apparaît fondamentalement différente de celle des sols.

AUTEURS CITES

BACHELIER G., 1968 a. — Contribution à l'étude de la minéralisaiton du carbone des sols. *Mémoires ORSTOM* (Paris), n° 30, 145 p.

BACHELIER G., 1968 b. — Problèmes relatifs à l'atmosphère du sol et utilisation possible d'un détecteur de gaz pour la mesure de sa teneur en gaz carbonique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **VI**, 1, pp. 95-104.

BACHELIER G., 1969. — Coloration du fer ferreux dans les profils pédologiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **VII**, 2.

BAUZON D., ROUILLER J., BACHELIER G., 1967. — Caractéristiques pédologiques et microbiologiques des sols de la station R. C. P. 40 de la Forêt de Sénart et du parc de Brunoy. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, **IV**, 4, 533-551.

CAILLEUX A., 1967. — Observations à une note de M. P. FREYTET. Meulières et « silcretes ». *C. R. somm. Séances Soc. Géol. de Fr.*, fasc. 2, Séance du 6 février 1967, pp. 53-54.

CAILLEUX A., MICHEL J. P., 1967. — Sur la sédimentologie des alluvions plio-quaternaires d'Yerres et de Sénart au SE de Paris. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynamique* (2), **IX**, 5, pp. 415-424.

COMBEAU A., 1965. — Variations saisonnières de la stabilité structurale du sol en région tempérée. Comparaison avec la zone tropicale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **III**, 2, pp. 123-138.

DUCHAUFOUR Ph., 1960. — *Précis de Pédologie*, Masson éd. (Paris), 438 pages.

FEDOROFF N., 1968. — Genèse et morphologie de sols à horizon B Textural en France atlantique. *Science du sol* (Suppl. *Bull. Ass. Fr. Etudes du sol*), n° 1, pp. 29-65.

HENIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. — Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 1, pp. 73-92.

SCHACHTSCHABEL P., HEINEMANN C. G., 1967. — Wasserlösliche Kieselsäure in Lössböden. *Z. PflErnähr. Düng. Bodenk.*, 118, pp. 22-35.

THIBAULT Cl., 1968. — Δ pH et paléosols dans le quaternaire du sud-ouest de la France. *C. R. Acad. Sci.* (Fr.), juin 1968, **266**, 23, pp. 2215-2218.

TURMEL J. M., 1968. — Le potentiel d'oxydo-réduction de quelques mares de la forêt de Sénart. *Bull. Mus. Nat. Hist. Nat.*, 2e série, **40**, 1, pp. 254-260.